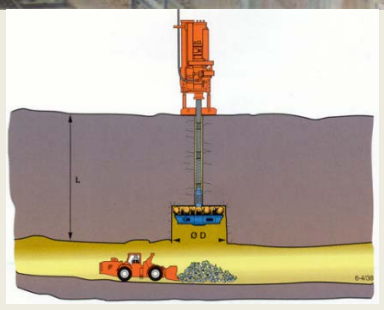
Διάνοιξη Σηράγγων

Αλέξανδρος Ι. Σοφιανός









Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Ζωγράφου, Φεβρουάριος 2018

ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ Ι. ΣΟΦΙΑΝΟΣ
Καθηγητής ΕΜΠ

Διάνοιξη Σηράγγων

Διάνοιξη Σηράγγων

Συγγραφή

Αλέξανδρος Ι. Σοφιανός

Αθήνα 2018

Αφιερώνεται στους γιούς μου Γιάννη και Ηλία-Παναγιώτη

Φωτογραφίες εξωφύλλου
Επάνω: Σιδηροδρομική σήραγγα Κακιάς Σκάλας.
Κάτω από αριστερά προς τα δεξιά: Μηχανή όρυξης σήραγγας προσαγωγής ΥΗΣ φράγματος Μεσοχώρας, Διάτρηση φρέατος, Νηοδόχος επιπυθμένιας σήραγγας Ακτίου-Πρέβεζας

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα ..... **v**

Πίνακας συντομεύσεων-ακρωνύμια ..... **xiv**

Πρόλογος ..... **xvi**

Εισαγωγή ..... **xvii**

Κεφάλαιο 1 ..... **1**

1. Ιστορική εξέλιξη της σηραγγοποιίας **1**

1.1 Ιστορικά στοιχεία **1**

1.2 Αρχαίες διανοίξεις **1**

1.2.1 Εμπόριο και σήραγγες από το 17ο μέχρι το 19ο αιώνα **5**

1.2.2 Τεχνικές διάνοιξης σε ανεξάρτητα τμήματα **9**

1.2.3 Η διάνοιξη με ασπίδα **16**

1.3 Σύγχρονες Μέθοδοι διάνοιξης **19**

1.3.1 Μέθοδοι του εκτοξευμένου σκυροδέματος (NATM) **20**

1.3.2 Βελτίωση του εδάφους **21**

1.3.3 Διάτρηση ανατίναξη **21**

1.3.4 Μηχανές κοπής **21**

1.3.5 Συνοπτικά **22**

1.4 Διάκριση των σηράγγων **25**

1.4.1 Σήραγγες διάτρησης **25**

1.4.2 Σήραγγες κοπής και επίχωσης **27**

1.4.3 Επιπυθμένιες σήραγγες **27**

1.4.4 Υποβρύχιες γέφυρες **28**

1.5 Σημαντικά έργα **29**

1.5.1 Συγκοινωνιακές σήραγγες στον κόσμο **29**

1.5.2 Συγκοινωνιακές σήραγγες στην Ελλάδα **29**

1.5.3 Οδικές σήραγγες **30**

1.6 Το μέλλον στις σήραγγες **34**

1.6.1 Εξέλιξη στις απαιτήσεις **34**

1.6.2 Υπεραστικά συγκοινωνιακά έργα **35**

1.6.3 Αστικά έργα **35**

1.6.4 Μελλοντικό πλαίσιο αποφάσεων **36**

Βιβλιογραφία **37**

Κριτήρια αξιολόγησης **38**
Κριτήριο αξιολόγησης 1 ..... **38**
Κεφάλαιο 2 ..... **39**
2. Μορφή των σηράγγων **39**
2.1 Εισαγωγή **39**
2.1.1 Είδη υπογείων έργων **39**
2.1.2 Γενικά γεωμετρικά στοιχεία **41**
2.2 Γεωμετρικός σχεδιασμός οδικών σηράγγων (Σακκάς, et al., 2002) **42**
2.2.1 Γενικά **42**
2.2.2 Γεωμετρική Θεώρηση **42**
2.2.3 Τυπική Διατομή **44**
2.2.4 Λοιπά Στοιχεία Σηράγγων **49**
2.2.5 Εσοχές **51**
2.2.6 Κυκλοφοριακοί Περιορισμοί **52**
2.3 Γεωμετρία σιδηροδρομικών σηράγγων **52**
2.4 Γεωμετρία σηράγγων μετρό **53**
2.5 Υδραυλικές σήραγγες **54**
2.6 Μορφή μεγάλων υπόγειων θαλάμων **56**
Βιβλιογραφία **60**
Κριτήρια αξιολόγησης **61**
Κριτήριο αξιολόγησης 1 ..... **61**
Κεφάλαιο 3 ..... **65**
3. Γεωτεχνική έρευνα και χαρακτηρισμός γεωμάζας **65**
3.1 Εισαγωγή **65**
3.1.1 Έδαφος **66**
3.1.2 Πέτρωμα – βραχομάζα **67**
3.2 Στάδια γεωτεχνικής διερεύνησης **76**
3.2.1 Γενικά **76**
3.2.2 Απαιτούμενες γεωλογικές και γεωτεχνικές μελέτες και έρευνες στην περιοχή σηράγγων οδοποιίας **80**
3.3 Αξιολόγηση συνθηκών και παράμετροι υπολογισμών **82**
3.3.1 Αξιολόγηση γεωτεχνικής έρευνας **82**
3.3.2 Γεωτεχνικές παράμετροι **85**
Βιβλιογραφία **90**
Κριτήρια αξιολόγησης **91**
Κριτήριο αξιολόγησης 1 ..... **91**
Απάντηση/Λύση **91**
Κριτήριο αξιολόγησης 2 ..... **91**

Απάντηση/Λύση **91**
Κριτήριο αξιολόγησης 3 ..... **91**
Απάντηση/Λύση **91**
Κριτήριο αξιολόγησης 4 ..... **91**
Απάντηση/Λύση **91**
Κριτήριο αξιολόγησης 5 ..... **91**
Απάντηση/Λύση **91**
Κριτήριο αξιολόγησης 6 ..... **91**
Απάντηση/Λύση **91**
Κριτήριο αξιολόγησης 7 ..... **91**
Απάντηση/Λύση **91**

Κεφάλαιο 4 ..... **93**

4. Συμβατική διάνοιξη βραχωδών σχηματισμών με ανατινάξεις **93**
4.1 Εισαγωγή **93**
4.2 Ο κύκλος «διάτρηση– ανατίναξη» **94**
4.2.1 Εξοπλισμός διάτρησης **95**
4.2.2 Διάταξη διατρημάτων – γόμωση **100**
4.2.3 Πυροδότηση **108**
4.2.4 Παραδείγματα ανατίναξης **110**
4.2.5 Μετά την ανατίναξη **111**
4.3 Εμπειρικές οδηγίες διάνοιξης **113**
4.3.1 Οδηγίες με βάση το RQD **114**
4.3.2 Οδηγίες από τη γεωμηχανική ταξινόμηση (RMR) **114**
4.3.3 Νορβηγική Μέθοδος Σηραγγοποιίας (NMT) **119**
4.4 Υπόγειοι θάλαμοι **122**
4.4.1 Γεωλογικές Συνθήκες - Σχεδιασμός Μεγάλων Υπόγειων Εκσκαφών. **122**
4.4.2 Μέθοδοι Όρυξης - Υποστήριξης **123**
4.5 Αριθμητική ανάλυση της συμπεριφοράς **125**
4.5.1 Κατάπτωση ή ολίσθηση τεμάχους **126**
4.5.2 Θραύση ισχυρής βραχομάζας σε θέση συγκέντρωσης τάσης **126**
4.5.3 Διαρροή κατακερματισμένης βραχομάζας **127**

Βιβλιογραφία **127**

Κριτήρια αξιολόγησης **130**
Κριτήριο αξιολόγησης 1 ..... **130**
Κριτήριο αξιολόγησης 2 ..... **131**
Απάντηση/Λύση **131**

Θέμα. Σήραγγα σε σκληρό πέτρωμα **132**

Κεφάλαιο 5 ..... **135**

5. Συμβατική διάνοιξη με μηχανικά μέσα **135**

5.1 Εισαγωγή **135**

5.2 Μηχανές κοπής **136**

5.2.1 Σφύρα **136**

5.2.2 Εκσκαφέας **136**

5.2.3 Φρέζα **137**

5.3 Ορεινές σήραγγες **139**

5.3.1 Παραμόρφωση της γεωμάζας **139**

5.3.2 Διάνοιξη σε δύο φάσεις με εύτροπη υποστήριξη - Νέα αυστριακή μέθοδος (NATM/NÖT, Spritzbetonbauweise) **153**

5.3.3 Ολομέτωπη διάνοιξη και δύστροπη υποστήριξη - ADECO-RS (Lunardi, 2000) **157**

5.4 Αστικές σήραγγες **167**

5.4.1 Διάνοιξη με πολλαπλές στοές - Η μέθοδος SCL (Sprayed Concrete Lining) **167**

5.4.2 Ολομέτωπη διάνοιξη - Μέθοδος LaserShell (Eddie & Newmann, 2005) **173**

Βιβλιογραφία **178**

Κριτήρια αξιολόγησης **180**

Κριτήριο αξιολόγησης 1 ..... **180**

Απάντηση/Λύση **180**

Κριτήριο Αξιολόγησης 2 ..... **180**

Κριτήριο αξιολόγησης 3 ..... **180**

Θέμα. Διάνοιξη ορεινής σήραγγας με μηχανικά μέσα **181**

Κεφάλαιο 6 ..... **185**

6. Στόμια σηράγγων **185**

6.1 Γενικά **185**

6.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του έργου **186**

6.2.1 Μορφολογία της περιοχής **186**

6.2.2 Περιορισμοί από ύπαρξη άλλων κατασκευών **192**

6.3 Γεωλογικές συνθήκες **193**

6.3.1 Τοπικές γεωλογικές συνθήκες διάνοιξης **193**

6.3.2 Ευστάθεια περιοχής **193**

6.3.3 Ύπαρξη νερών **194**

6.3.4 Εντατικό πεδίο **194**

6.4 Εκσκαφή και διαμόρφωση φορέων αντιστήριξης **195**

6.4.1 Προ-όρυγμα και ετοιμασία υπόγειας διάνοιξης **195**

6.4.2 Στατική των τοιχίων **197**

6.5 Λειτουργικότητα **199**

6.5.1 Οδική ασφάλεια **199**

6.5.2 Φροντίδα περιοχής ... 202
6.6 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις ... 203
6.6.1 Αισθητική αποδοχή ... 204
6.6.2 Επιπτώσεις σε περιοχές υψηλής ή μέσης πυκνότητας δόμησης ... 206
6.7 Δράσεις κατά το σχεδιασμό στομίων σηράγγων ... 206
6.7.1 Τοπίο και περιβαλλοντική ανάλυση (Pelizza et al, 1998) ... 206
6.7.2 Έρευνα υπεδάφους ... 207
6.7.3 Επιφανειακοί και υπόγειοι περιορισμοί ... 207
6.7.4 Πρόβλεψη μηχανικής συμπεριφοράς της γεωμάζας ... 207
6.7.5 Αρχιτεκτονική και περιβαλλοντική μελέτη ... 207
6.7.6 Επιλογή της μεθόδου μελέτης και υπολογισμοί ... 207

Βιβλιογραφία ... 208

Κριτήρια αξιολόγησης ... 209

Κριτήριο αξιολόγησης 1 ... 209

Θέμα ... 210

Κεφάλαιο 7 ... 213

7. Εκμηχανισμένη διάνοιξη από μηχανές κύριας δοκού ... 213

7.1 Εισαγωγή ... 213
7.1.1 Ιστορικά στοιχεία ... 214
7.1.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή TBM ... 214
7.1.3 Διάκριση μηχανών ... 216
7.1.4 Τα μέρη της μηχανής ... 218
7.2 Εξόρυξη του πετρώματος ... 219
7.2.1 Κοπτική κεφαλή (Cutter Head) ... 219
7.2.2 Μεταφορά μπαζών ... 223
7.3 Προχώρηση της μηχανής ... 223
7.3.1 Κύριο σύστημα περιστροφής (Main Drive) ... 223
7.3.2 Κύριο εφέδρανο (Main Bearing) ... 224
7.3.3 Ωστήρες πάκτωσης (Grippers) ... 224
7.3.4 Σύστημα ελέγχου διεύθυνσης και πλοήγησης ... 226
7.4 Ώση και Ροπή μηχανών ανοικτού μετώπου ... 226
7.4.1 Ώση ... 226
7.4.2 Ροπή στρέψης ... 228
7.4.3 Διαβίβαση δυνάμεων και ροπών στο πέτρωμα ... 228
7.5 Στήριξη του πετρώματος ... 229
7.6 Συρμός εξυπηρέτησης ... 230
7.7 Μέτρηση της χρονικής επίδοσης ... 231
7.7.1 Δραστηριότητες ... 232

7.7.2 Παράμετροι χρονικής επίδοσης ... 233
7.7.3 Διάρκεια κατασκευής σηράγγων από TBM ανοικτού μετώπου ... 234

Βιβλιογραφία ... 236

Κριτήρια αξιολόγησης ... 237
Κριτήριο αξιολόγησης 1. Απαιτούμενες δυνάμεις ώσης και ροπής ... 237
Κριτήριο αξιολόγησης 2. Υπολογισμός της διάρκειας κατασκευής σήραγγας ... 237
Κριτήριο αξιολόγησης 3. Υπολογισμός παραμέτρων με χρήση του Q_{TBM} ... 238
Απάντηση/Λύση ... 238

Θέμα: Υδραυλική σήραγγα εκτροπής ποταμού ... 239
Απάντηση/Λύση ... 240

Κεφάλαιο 8 ... 241

8. Εκμηχανισμένη διάνοιξη από ασπίδα ... 241
8.1 Εισαγωγή ... 241
8.2 Ασπίδες ανοικτού μετώπου ... 243
8.2.1 Ασπίδα δίχως στήριξη μετώπου ... 244
8.2.2 Ασπίδα με στήριξη μετώπου ... 246
8.2.3 Διπλή ασπίδα (DSM) ... 248
8.3 Ασπίδες κλειστού μετώπου ... 251
8.3.1 Ασπίδες στήριξης με πιεσμένο αέρα *(ή T3)* ... 251
8.3.2 Ασπίδες πολφού ... 252
8.3.3 Ασπίδες ολομέτωπης κοπής, εδαφικής αντισταθμιστικής πίεσης *(EPBS, SM-V5)* ... 260
8.3.4 Μικτή Μετατρεπόμενου Τύπου Ασπίδα «KSM» ... 268
8.4 Ασπίδες ολομέτωπης μη κυκλικής κοπής ... 268
8.5 Επιλογή της κατάλληλης ασπίδας ... 269
8.6 Ώση και ροπή μηχανών κλειστού μετώπου ... 270
8.6.1 Ώση ... 270
8.6.2 Ροπή στρέψης ... 272

Βιβλιογραφία ... 274

Κριτήρια αξιολόγησης ... 274

Θέματα ... 275

Κεφάλαιο 9 ... 277

9. Ώθηση σηράγγων ... 277
9.1 Οριζόντιες κατευθυνόμενες γεωτρήσεις ... 277
9.2 Προώθηση σωλήνων ... 280
9.2.1 Η μέθοδος ... 281
9.2.2 Τα μέρη της διάνοιξης ... 286

9.2.3 Οικονομική σύγκριση με την ανοικτή εκσκαφή ... 295
9.2.4 Κατασκευή συνδετήριων σωληνώσεων ... 299
9.2.5 Αποκατάσταση αγωγών (Rehabilitation) ... 300
9.3 Ώθηση κιβωτίων ... 303
Βιβλιογραφία ... 308
Κριτήρια αξιολόγησης ... 310
Κριτήριο αξιολόγησης 1. Ώθηση σωλήνων σε υπερστερεοποιημένη άργιλο ... 310
Απάντηση/Λύση ... 311
Κριτήριο αξιολόγησης 2. Ώθηση σωλήνων σε αμμοχάλικα υπό τον υδροφόρο ... 316
Απάντηση/Λύση ... 317
Κεφάλαιο 10 ... 323
10. Φρέατα ... 323
10.1 Αβαθή αστικά φρέατα ... 323
10.1.1 Εκσκαφή ... 324
10.1.2 Προαντιστήριξη εδαφών ... 325
10.1.3 Αντιστήριξη με την προχώρηση ... 328
10.1.4 Αντιμετώπιση της υδροφορίας των εδαφών ... 331
10.1.5 Τελική επένδυση αβαθών φρεάτων ... 336
10.2 Βαθιά εξωαστικά φρέατα ... 337
10.2.1 Εισαγωγή ... 337
10.2.2 Ανιόντα ... 338
10.2.3 Κατιόντα ... 343
Βιβλιογραφία ... 351
Κριτήρια αξιολόγησης ... 352
Κριτήριο αξιολόγησης 1. ... 352
Κριτήριο αξιολόγησης 2. ... 352
Θέμα. Φρέαρ Σήραγγας Δρίσκου ... 353
Κεφάλαιο 11 ... 357
11. Ανοικτή εκσκαφή ... 357
11.1 Πεδίο εφαρμογής ... 357
11.1.1 Μορφή ... 359
11.1.2 Μέθοδοι κατασκευής ... 360
11.2 Δόμηση εκ των κάτω προς τα άνω (κοπής & επικάλυψης - cut & cover) ... 360
11.2.1 Το όρυγμα της σήραγγας ... 361
11.2.2 Αντιστήριξη πρανών εκσκαφής ... 362
11.3 Δόμηση σήραγγας εκ των άνω προς τα κάτω (top down ή cover & cut) ... 370

11.3.1 Κατασκευή σταθμών ... 371
11.3.2 Κατασκευή σηράγγων ... 372
11.4 Μελέτη ... 373
11.4.1 Γενικά ... 373
11.4.2 Φόρτιση του δομήματος ... 374
11.4.3 Συνδυασμοί φορτίων ... 378
11.4.4 Όργανα και παρακολούθηση ... 378
11.5 Μόνιμος φορέας ... 379
11.5.1 Θεμελίωση της σήραγγας ... 379
11.5.2 Δόμημα της σήραγγας ... 380
11.5.3 Αρμοί και στεγάνωση ... 381

Βιβλιογραφία ... 383

Κριτήρια αξιολόγησης ... 384
Κριτήριο αξιολόγησης 1. ... 384

Θέμα ... 385

Κεφάλαιο 12 ... 387

12. Ποντιζόμενες σήραγγες ... 387
12.1 Εισαγωγή ... 387
12.2 Φορείς επιπυθμένιων σηράγγων ... 388
12.2.1 Κελύφη από χάλυβα και σκυρόδεμα ... 389
12.2.2 Φορέας από σκυρόδεμα ... 391
12.3 Σχεδιασμός ζεύξης πορθμού ... 394
12.4 Το μέλλον ... 396

Βιβλιογραφία ... 399

Κριτήρια αξιολόγησης ... 400
Κριτήριο αξιολόγησης 1 ... 400
Απάντηση/Λύση ... 400

Κεφάλαιο 13 ... 401

13. Γεωτεχνική παρακολούθηση ... 401
13.1 Εισαγωγή ... 401
13.1.1 Μετρούμενα μεγέθη ... 401
13.1.2 Χαρακτηριστικά γνωρίσματα ... 402
13.1.3 Λειτουργία ... 403
13.2 Μετρητές ... 404
13.2.1 Συγκλισιόμετρα ... 405
13.2.2 Επιμηκυνσιόμετρα γεώτρησης ... 405

13.2.3 Μετρητικά αγκύρια 406
13.2.4 Αποκλισιόμετρα 407
13.2.5 Κύτταρα πίεσης 407
13.2.6 Μέτρηση της πίεσης σε γεώτρηση 409
13.2.7 Πιεζόμετρα 409
13.2.8 Μετρητές φορτίου αγκυρίων 410
13.2.9 Εγκιβωτισμένοι μετρητές παραμόρφωσης 411
13.2.10 Ρωγμόμετρα 411
13.2.11 Μετρητές ακουστικής εκπομπής 411
13.3 Θέσεις τοποθέτησης 412
13.4 Επίγειες καθιζήσεις λόγω διάνοιξης σηράγγων 414
13.4.1 Απώλεια όγκου εδάφους 414
13.4.2 Καθιζήσεις λόγω απώλειας όγκου εδάφους 414
13.4.3 Μέτρηση των μετατοπίσεων του εδάφους 415
13.4.4 Επικινδυνότητα καθιζήσεων 415

Βιβλιογραφία 416

Κριτήρια αξιολόγησης 417

Κριτήριο αξιολόγησης 1 417
Απάντηση/Λύση 417
Κριτήριο αξιολόγησης 2 417
Απάντηση/Λύση 417

Κεφάλαιο 14 419

14. Παράρτημα 419

14.1 Όροι που χρησιμοποιούνται στα κείμενα της σηραγγοποιίας 419
14.2 Συνοπτικό Λεξικό 423

Πίνακας συντομεύσεων-ακρωνύμια

AASHO	American Association of State Highway Officials
ADS	Anti-Drag System
ASTM	American Society Testing Materials
BSI	British Standards Institute
BTS	British Tunnelling Society
CDM	Cement Deep Mixing
CPT	Cone Penetration Test
CTRL	Channel Tunnel Rail Link
DIN	Deutsche Industrie Normen
ΕΕΣΥΕ	Ελληνική Επιτροπή Σηράγγων & Υπογείων Έργων
ΕΛΟΤ	Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης
EPBM	Earth Pressure Balance Machine
EPDM	Ethylene-Propylene-Diene Monomer
ESR	Excavation Support Ratio
FSTT	French Society for Trenchless Technology
GBR	Geotechnical Baseline Report
GFR	Geotechnical Factual Report
GIR	Geotechnical Interpretive Report
GSL	Ground Surface Level
GWL	GroundWater Level (table)
HDD	Horizontal Directional Drilling
HDPE	High Density PolyEthylene
HME	Hypothetical Modulus of Elasticity
HSE	Health and Safety Executive, UK
ICE	Institution of Civil Engineers, UK
ISRM	International Society for Rock Mechanics
ITA	International Tunnelling Association
ITIG	International Tunnelling Insurance Group
LF	Load Factor (= N/N_c)
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
NATM	New Austrian Tunnelling Method
ÖBV	Österreichischer Beton Verein
PFA	Pulverized Fuel Ash
PJA	Pipe Jacking Association
RMR	Rock Mass Rating
RQD	Rock Quality Designation
SCL	Sprayed Concrete Lining
SCR	Solid Core Recovery

SGI	Spheroidal Graphite (cast) Iron
SISG	Site Investigation Steering Group
SPT	Standard Penetration Test
SRF	Stress Reduction Factor
SSP	Seismic Soft-ground Probing
STM	Slurry Tunnelling Machine
SWOT	Storm Water Outfall Tunnel
TAM	Tube-A-Manchette
TBM	Tunnel Boring Machine
TCR	Total Core Recovery
ΤΠ	Τεχνική Προδιαγραφή
TSG	Tail Shield Grease
VSP	Vertical Seismic Profiling

Πρόλογος

Η διάνοιξη στοών έχει τις ρίζες της πριν από την καταγεγραμμένη ιστορία. Η ανάπτυξη όμως των πολιτικών σηράγγων πραγματοποιείται κυρίως μετά την αναγέννηση. Η ενασχόληση με τις σήραγγες στην Ελλάδα, πριν από το 1980 περιοριζότανε στα υπόγεια ορυχεία, καθώς και σε μικρής διαμέτρου σιδηροδρομικές και υδραυλικές σήραγγες, γενικά σε σκληρά πετρώματα. Μετά το 1985 κατασκευάστηκε πληθώρα σηράγγων, κυρίως συγκοινωνιακών, με μεγάλα μήκη και διατομές, σε δύσκολα εδάφη, και οι Έλληνες μηχανικοί απέκτησαν σημαντική σχετική εμπειρία.

Το βιβλίο αυτό επιδιώκει να δώσει εισαγωγικές γνώσεις στη σηραγγοποιία για τους φοιτητές του 9ου εξαμήνου της Σχολής ΜΜΜ του ΕΜΠ, καθώς και σε άτομα που έχουν μικρή σχετικά εμπειρία στο θέμα. Η διάνοιξη σήραγγας είναι μια συναρπαστική ενασχόληση, και σε αντίθεση με οποιαδήποτε άλλη κατασκευή, το έδαφος γύρω από τη σήραγγα αποτελεί αναπόσπαστο προσυμπιεσμένο μέρος του τελικού δομήματος και έχει καθοριστικό ρόλο στη σταθερότητά του. Η εκμάθηση της τέχνης της σηραγγοποιίας δεν μπορεί να επιτευχθεί μόνο από βιβλία, και πολλές ουσιαστικές αποφάσεις βασίζονται στην κρίση του μηχανικού, την εμπειρία, ακόμη και στη διαίσθησή του. Συχνά δεν υπάρχει μία απάντηση σε κάθε ερώτημα, και συχνά η απάντηση εξαρτάται από αυτόν στον οποίο απευθύνεται. Όπου αναγράφονται τιμές για παραμέτρους, αυτές πρέπει να αντιμετωπίζονται μόνο ενδεικτικά, και πρέπει να επαληθεύονται, καθώς μπορεί να διαφέρουν ουσιαστικά από αυτές που αναφέρονται στα βιβλία.

Το βιβλίο σκοπό έχει να βοηθήσει τον αναγνώστη να καταλάβει τη σηραγγοποιία. Προκειμένου να το πετύχει, στοχεύει να του παράσχει βασικές πληροφορίες, έτσι ώστε αυτός να μπορεί είτε να λαμβάνει τεκμηριωμένες αποφάσεις ή να μπορεί να συμβουλεύεται πιο εξειδικευμένες απαντήσεις σε συγκεκριμένα θέματα. Προς τούτο παρέχει πληθώρα σχετικής βιβλιογραφίας, καθώς και προτάσεις για εμβάθυνση μέσω ειδικών συγγραμμάτων. Επίσης δίνει στον αναγνώστη τα εργαλεία που απαιτούνται για την κριτική εκτίμηση των τεχνικών διάνοιξης και τη συνειδητοποίηση ότι πλήρης εκμάθηση δεν μπορεί να αποκτηθεί μόνο από σχετικά εγχειρίδια. Το σύγγραμμα ελπίζει να αναδείξει το εύρος του θέματος και ότι για να γίνει κάποιος εμπειρογνώμονας, απαιτείται πολυετής πείρα. Την ίδια στιγμή, αποσκοπεί να δείξει στον αναγνώστη την ιδιαιτερότητα της σηραγγοποιίας και το γεγονός ότι υπάρχουν πολλές άγνωστες παράμετροι που απαιτούν την κρίση του μηχανικού.

Εισαγωγή

Σήραγγες κατασκευάζονται τόσον ως πολιτικά-στρατιωτικά όσον και ως εξορυκτικά έργα. Και μολονότι οι τεχνικές διάνοιξης τους είναι παρόμοιες, διαφέρουν ως προς τη σπουδαιότητά τους και το χρόνο ζωής τους, άρα και στη βαρύτητα της κατασκευής τους. Η γεωτεχνική μηχανική, η πιο σημαντική επιστήμη που χρησιμοποιείται στη σηραγγοποιία, έχει τις ρίζες της στο δέκατο όγδοο αιώνα. Η σηραγγοποιία διακρίνεται αφενός στο σχεδιασμό-μελέτη και αφετέρου στη διάνοιξη-κατασκευή. Αν και υπάρχει αλληλεπικάλυψη μεταξύ αυτών των δύο φάσεων, και οι δύο απαιτούν τις ίδιες πληροφορίες αλλά για διαφορετικούς λόγους. Ο μελετητής της σήραγγας ενδιαφέρεται για τις γεωτεχνικές ιδιότητες του εδάφους, οι οποίες περιλαμβάνουν παραμέτρους εδάφους, υδροφορία, κλπ, που τις χρησιμοποιεί για να καθορίσει την χάραξη της σήραγγας, το βάθος, τον τύπο της απαιτούμενης επένδυσης και άλλες λεπτομέρειες για την ασφαλή τελική χρήση. Ο μελετητής πρέπει να έχει μια αίσθηση του τι είναι πρακτικό. Επειδή οι σήραγγες είναι ακριβές κατασκευές, πρέπει να εκπονήσει τον πιο οικονομικό σχεδιασμό που θα επιτυγχάνει τους στόχους της σήραγγας. Γι' αυτό θα πρέπει να έχει αρκετή γνώση των τεχνικών της σηραγγοποιίας για να είναι ο σχεδιασμός κατασκευάσιμος. Συχνά συνεργάζεται ο μηχανικός κατασκευής με το μελετητή, ώστε να παρέχονται στον δεύτερο οι απαραίτητες κατασκευαστικές πληροφορίες. Ο μηχανικός κατασκευής μπορεί στη συνέχεια να βοηθήσει στην κατασκευή της σήραγγας παρέχοντας πληροφορίες από τη μελέτη.

Ιστορικά, η σηραγγοποιία είναι γεμάτη με κινδύνους. Ορύχοι[1] σκοτώνονταν από δηλητηριώδη αέρια, καταπτώσεις, πυρκαγιές, ή συνθλίβονταν από τον εξοπλισμό, ενώ παλαιότερα, ως δούλοι εργάζονταν μέχρι θανάτου. Αν και έχουν γίνει πολλές βελτιώσεις τα τελευταία 100 χρόνια, μερικοί από αυτούς τους κινδύνους εξακολουθούν να υπάρχουν. Στα μέσα του περασμένου αιώνα, θα μπορούσε κανείς να θεωρήσει ότι θα υπήρχε ένας θάνατος ανά 1.5 χιλιόμετρο σήραγγας, κάτι που ευτυχώς δεν ισχύει πλέον. Η σημαντικότερη συμβολή του μηχανικού κατασκευής της σήραγγας στην κατασκευή της, είναι η ασφάλεια.

Όπως και ο μελετητής, ο κατασκευαστής της σήραγγας ενδιαφέρεται για τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της βραχομάζας μέσα από την οποία θα διανοιχθεί η σήραγγα. Όπως ο μελετητής, πρέπει και αυτός να προσδιορίσει την απαιτούμενη υποστήριξη, την καταλληλότερη μέθοδο εξόρυξης, την αναμενόμενη διάρκεια ζωής των κοπτικών, κλπ. Ο κατασκευαστής πρέπει επίσης να γνωρίζει την υδροφορία, όχι τόσο για την τελική επένδυση, αλλά πώς να την χειριστεί κατά την όρυξη.

Η σηραγγοποιία εξακολουθεί να είναι μια τέχνη. Υπάρχουν προσομοιώματα που παρέχουν εποπτεία για τη συμπεριφορά της σήραγγας, ωστόσο η απόφαση επιτόπου θα μπορούσε πολύ καλά να γίνει από κάποιον, που μολονότι δεν γνωρίζει το όνομα του πετρώματος που διανοίγεται, ξέρει τι θα το κρατήσει στη θέση του. Η εμπειρία είναι ένας κρίσιμος παράγοντας στη σηραγγοποιία. Ο μηχανικός δεν επιλέγει τις γεωλογικές συνθήκες της σήραγγας, και πρέπει να έχει δει παρόμοιο γεωυλικό με αυτό της διάνοιξης και να γνωρίζει πώς συμπεριφέρεται σε διάφορες συνθήκες. Η πιο σημαντική πληροφορία για το γεωυλικό παρέχεται από τις γεωτρήσεις. Ο τύπος και τα χαρακτηριστικά του βράχου μπορούν να αλλάζουν δίπλα από τις γεωτρήσεις. Μπορεί να υπάρχει μια επιφανειακή εμφάνιση που να δείχνει τη διεύθυνση και κλίση των ασυνεχειών, αλλά σε μια βαθιά σήραγγα μπορεί να προσφέρει ελάχιστες πληροφορίες. Γεωφυσικές μέθοδοι διερεύνησης μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν, όμως έχουν περιορισμένες δυνατότητες. Όταν είναι διαθέσιμα όλα τα εργαλεία γεωτεχνικής διερεύνησης, ο μηχανικός της σήραγγας μπορεί να προβλέψει αρκετά καλά τις συνθήκες διάνοιξης. Ωστόσο, πρέπει να είναι προσεκτικός και προετοιμασμένος για εκπλήξεις.

Μερικοί πιστεύουν ότι αυτά τα προβλήματα είναι που καθιστούν τη σηραγγοποιία ενδιαφέρουσα. Ελκυόμενος από το άγνωστο, ο ορύχος είναι έτοιμος να εισέλθει στη γη και να χειριστεί οποιοδήποτε πρόβλημα, είτε πρόκειται για μια αλλαγή στις συνθήκες του εδάφους ή μια απροσδόκητη εισροή νερού. Ίσως χρειαστεί να τροποποιήσει τη μέθοδο εξόρυξης ή της στήριξης του εδάφους ή και τα δύο ή να ενέσει κονίαμα για να σφραγίσει ή να επιβραδύνει την εισροή νερού, αλλά θα συνεχίσει να προχωράει. Παρόλο που η δουλειά είναι σκληρή και βρώμικη, όταν ολοκληρωθεί η διάνοιξη στη σωστή θέση, θυμάται ότι όλα έγιναν στα τυφλά. Όπως και όταν οι πρώτοι εξερευνητές είχαν ελλιπείς χάρτες, ο ορύχος έχει γεωτεχνικές εκθέσεις που δεν μπορούν να τους πουν όλα όσα θα συναντηθούν. Οι ορύχοι, όπως έκαναν χιλιάδες χρόνια πριν, εισέρχονται σε

[1] Ο μεταλλωρύχος, ανθρακωρύχος, εργάτης διάνοιξης υπόγειου έργου (miner)

έναν κόσμο άγνωστων συνθηκών και κινδύνων και πετυχαίνουν. Το βιβλίο στοχεύει να δώσει τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται από τους ορύχους, προκειμένου να πετύχουν τις διανοίξεις των σηράγγων που τους ανατίθενται.

Υπόγειες διανοίξεις πραγματοποιούνταν ήδη πριν από την ιστορική αρχαιότητα και θα εξακολουθούν να πραγματοποιούνται στο μέλλον. Στο 1ο κεφάλαιο αναπτύσσεται η διαδρομή της σηραγγοποιίας από τις πρώτες προσπάθειες στη λιθική εποχή μέχρι σήμερα, και πως αναμένεται η εξέλιξή τους στο μέλλον. Ο τρόπος διάνοιξης εξελίσσονταν με βάση τα μέσα κάθε εποχής. Αναπτύσσεται περιληπτικά η ιστορική διαδρομή της σηραγγοποιίας από την αρχαιότητα μέχρι σήμερα, και οι τάσεις εξέλιξης της στο προσεχές μέλλον.

Η μορφή των σηράγγων διαμορφώνεται κυρίως με βάση της απαιτήσεις λειτουργίας τους. Στο 2ο κεφάλαιο δίνονται οι τυποποιημένες ωφέλιμες διατομές των συγκοινωνιακών σηράγγων, καθώς και χρησιμοποιούμενες μορφές υδαταγωγών σηράγγων και αναπτύσσεται ο γεωμετρικός σχεδιασμός των σηράγγων που διανοίγονται κατά την κατασκευή αυτών των έργων.

Για τη μελέτη της κατασκευής και λειτουργίας των σηράγγων απαιτείται η γνώση της γεωλογίας του χώρου διέλευσης. Στο 3ο κεφάλαιο δίνονται τα στοιχεία που απαιτείται να συλλεγούν και οι παράμετροι που θα πρέπει να εξαχθούν προκειμένου να μελετηθεί η διάνοιξη μιας σήραγγας. Η εφικτότητα, η μέθοδος διάνοιξης και το κόστος της κατασκευής ενός υπογείου έργου βασίζονται στις γεωλογικές συνθήκες της περιοχής του. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιείται, σε στάδια γεωτεχνική διερεύνηση, διαχωρίζονται οι περιοχές με παρόμοιες συνθήκες, και τέλος προσδιορίζονται οι γεωτεχνικές παράμετροι που απαιτούνται στους στατικούς υπολογισμούς.

Η διάνοιξη μιας σήραγγας πραγματοποιείται με διάφορες τεχνοτροπίες. Η SIA 192, προκειμένου να κοστολογήσει τη διάνοιξη των σηράγγων, ορίζει 5 μεθόδους όρυξης, 5 τύπους προσβολής, 6 κατηγορίες στήριξης, και 3 τύπους διατρησιμότητας-εκσκαψιμότητας.

Οι μέθοδοι όρυξης είναι: (1) Ανατινάξεις (SPV≡D&B), (2) Μηχανή (ολομέτωπη) διάτρησης σήραγγας (σκληρού) πετρώματος (TBM), (3) Σημειακή μηχανική κοπή βράχου (MUF≡RH), (4) Σημειακή μηχανική κοπή εδάφους-μαλακού πετρώματος (MUL≡EXC), (5) Ασπίδα διάνοιξης (εδάφους) σήραγγας (SM).

Οι τύποι προσβολής διακρίνονται, με βάση τις φάσεις εξόρυξης του μετώπου, σε: A. ολομέτωπη, B. πρώτα άνω ημιδιατομή και μετά εκσκαφή βαθμίδας και ανάστροφου, C. πρώτα εκσκαφή διαιρεμένης άνω ημιδιατομής και μετά εκσκαφή βαθμίδας και ανάστροφου, D. πλευρικές στοές που διανοίγονται διαδοχικά πρώτα η άνω ημιδιατομή και μετά η βαθμίδα και το ανάστροφο τόξο, E. Άλλοι τύποι μερικών διαδοχικών εξορύξεων καθορισμένοι από τον ιδιοκτήτη σύμφωνα με το έργο.

Οι κατηγορίες στήριξης διακρίνονται με βάση τη δυσκολία που δημιουργούν στις εργασίες της διάνοιξης, σε: (1) ελάχιστης παρεμπόδισης, (2) μικρής παρέμβασης, (3) σημαντικής παρέμβασης, (4) δριμείας παρέμβασης (άμεση στήριξη ακολουθεί κάθε κύκλο), (5) εξαιρετικά σοβαρή παρέμβαση που μπορεί να απαιτεί άμεση στήριξη του μετώπου ή βοηθητικά κατασκευαστικά μέτρα, (T) η στήριξη αποτελείται από τόξα επένδυσης τοποθετημένα εντός της ασπίδας.

	Σκληρό πέτρωμα			Έδαφος-Μαλακό πέτρωμα	
	1	2	3	4	5
Μέθοδος εξόρυξης	SPV≡D&B	TBM	MUF≡RH	MUL≡EXC	SM
Τύπος προσβολής	A, B, C, D, E	A	A, B, C, D, E	A, B, C, D, E	A
Κατηγορία στήριξης	1, 2, 3, 4, 5	1, 2, 3, 4, 5, T	1, 2, 3, 4, 5		T
Κατηγορία εξορυξιμότητας	-	Διατρησιμότητα x, y, z	Εκσκαψιμότητα x, y, z	-	Εκσκαψιμότητα x, y, z
Μέτρα στήριξης					
Στήριξη μετώπου				a, b, c	
Παραδείγματα	B2 D4 E5	3x 2z 1y	A3x B2y C4z	B/Jetting/a D/Δοκοί προπορείας B/Ασπίδα με λάμες/c	Ασπίδα πολφού/x Ασπίδα EPB/x Μικτή ασπίδα/z

Στα επόμενα τρία κεφάλαια αναπτύσσονται οι συμβατικές μέθοδοι διάνοιξης σηράγγων. Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται είναι αυτές του εκτοξευομένου σκυροδέματος, οι οποίες λαμβάνουν ανάλογα με την εφαρμογή τους ονομασίες όπως NATM, NMT, κλπ.

Στο κεφάλαιο 4 αναπτύσσονται οι μέθοδοι διάνοιξης με ανατινάξεις (μέθοδος εξόρυξης 1). Πρόκειται για διαδοχική μέθοδο διάνοιξης μέσα σε βραχώδεις σχηματισμούς. Αρχικά αναπτύσσονται τα διαδοχικά στάδια της μεθόδου, ο απαιτούμενος εξοπλισμός για την ανατίναξη που είναι τα διατρητικά φορεία, οι εκρηκτικές ύλες που χρησιμοποιούνται, και δίνονται παραδείγματα εφαρμογών. Στη συνέχεια δίνονται τρεις εμπειρικές οδηγίες διάνοιξης ανάλογα με την ποιότητα του πετρώματος, το μέγεθος και τη σημασία του έργου. Το κεφάλαιο κλείνει με οδηγίες για την ανάλυση των επιλεγμένων μεθόδων διάνοιξης με αριθμητικές μεθόδους.

Στο κεφάλαιο 5 αναπτύσσονται οι μέθοδοι διάνοιξης με μηχανές σημειακής κοπής (μέθοδοι εξόρυξης 3, 4). Πρόκειται για διαδοχική μέθοδο διάνοιξης μέσα σε μαλακούς σχηματισμούς. Αρχικά αναπτύσσονται τα διαδοχικά στάδια της μεθόδου, ο απαιτούμενος εξοπλισμός για την εκσκαφή, και δίνονται παραδείγματα εφαρμογών. Στη συνέχεια δίνονται οι μέθοδοι διάνοιξης και η μελέτη τους, με βάση τις αναμενόμενες παραμορφώσεις και τις απαιτήσεις περιορισμού τους. Το κεφάλαιο κλείνει με οδηγίες για την ανάλυση των επιλεγμένων μεθόδων διάνοιξης με αριθμητικές μεθόδους.

Ειδική εφαρμογή των μεθόδων αυτών πραγματοποιείται κατά τη διαμόρφωση της περιοχής των στομίων, η οποία αναπτύσσεται στο κεφάλαιο 6. Στα στόμια των σηράγγων συναντάται το υπόγειο με το επίγειο τμήμα του έργου. Οι περιοχές αυτές κατασκευάζονται με συμβατικές μεθόδους διάνοιξης, που εξαρτώνται από τις γεωτεχνικές συνθήκες. Η διαμόρφωση των στομίων εξαρτάται επίσης από το ανάγλυφο της περιοχής . Αναπτύσσονται οι μέθοδοι σχεδιασμού τους.

Στα επόμενα τρία κεφάλαια αναπτύσσεται η εκμηχανισμένη διάνοιξη σηράγγων. Στο κεφάλαιο, 7 αναπτύσσεται η εκμηχανισμένη διάνοιξη (μέθοδος εξόρυξης 2) σηράγγων από μηχανές ολομέτωπης διάτρησης. Πρόκειται για διάνοιξη από μηχανές (TBM) που διατρούν ισχυρά πετρώματα, τα οποία τους επιτρέπουν ισχυρή πάκτωση στα τοιχώματα. Αναπτύσσονται οι τύποι των μηχανών, η λειτουργία τους, οι παράγοντες επιλογής τους, οι απαιτούμενες δυνάμεις προχώρησης, και η επίδοσή τους.

Στο κεφάλαιο 8, αναπτύσσεται η εκμηχανισμένη διάνοιξη (μέθοδος εξόρυξης 5) σηράγγων από ασπίδες. Πρόκειται για μηχανές που διατρούν πετρώματα, τα οποία κατά την εξόρυξη δεν είναι αυτοστηριζόμενα ή/και βρίσκονται υπό τον υδροφόρο ορίζοντα, και γενικά δεν επιτρέπουν ισχυρή πάκτωση στα τοιχώματα τους. Αναπτύσσονται οι τύποι των μηχανών, η λειτουργία τους, οι παράγοντες επιλογής τους, οι απαιτούμενες δυνάμεις προχώρησης, και η επίδοσή τους.

Στο κεφάλαιο 9 αναπτύσσονται οι μέθοδοι μηχανικής διάνοιξης σηράγγων με ώθηση σωλήνων από μακριά, κυρίως για σήραγγες μικρής και σπανιότερα μέσης διαμέτρου, που αφορούν συνήθως σήραγγες για δίκτυα κοινής ωφελείας. Τα δίκτυα κοινής ωφελείας απαιτούν τη διάνοιξη σηράγγων μικρής διαμέτρου, στις οποίες συχνά δεν δύναται να εισέλθει άνθρωπος. Οι σήραγγες αυτές κατασκευάζονται με μεθόδους της μικροσηραγγοποιίας, με συνεχή έλεγχο και προώθηση των σωλήνων τους από θέσεις έναρξης προς θέσεις στόχους. Η μέθοδος της από μακριά προώθησης των σωλήνων εφαρμόζεται και για τη διάνοιξη μέσης διαμέτρου σηράγγων, μικρότερου όμως μήκους. Η μέθοδος αυτή αποτελεί την τρίτη μέθοδο διάνοιξης σηράγγων, μετά τις του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και των TBM με στάσιμες επενδύσεις πίσω από αυτά.

Στο κεφάλαιο 10 αναπτύσσεται η κατασκευή φρεάτων, τόσον εξορυκτικών όσον και τεχνικών έργων. Τα φρέατα είναι υπόγειες κατακόρυφες ή παρακατακόρυφες διανοίξεις. Διακρίνονται σε αβαθή, που είναι γενικά τα αστικά, και σε βαθιά, που είναι τα μεταλλευτικά, αλλά και φρέατα πάνω από σήραγγες, υδροηλεκτρικούς σταθμούς, κλπ. Δεδομένου ότι η διάνοιξη αυτή δεν πραγματοποιείται σε οριζόντια, αλλά σε κατακόρυφη διεύθυνση, ενέχει πρόσθετες δυσκολίες και κινδύνους.

Στο κεφάλαιο 11 αναπτύσσεται η κατασκευή σηράγγων με μεθόδους ανοικτής εκσκαφής. Πρόκειται για τεχνική που ξεφεύγει από την κλασσική σηραγγοποιία, καθόσον η διάνοιξη δεν πραγματοποιείται υπόγεια. Όταν το υπόγειο δόμημα βρίσκεται πλησίον της επίγειας επιφάνειας, τότε οικονομοτεχνικά είναι προτιμότερη η διάνοιξη του συνόλου ή μέρους του υπόγειου έργου να πραγματοποιείται με ανοικτή εκσκαφή από την επιφάνεια.

Στο κεφάλαιο 12 αναπτύσσεται η κατασκευή επιπυθμένιων σηράγγων, οι οποίες γενικά κατασκευάζονται με πόντιση έτοιμων προκατασκευασμένων σπονδύλων σε σκαμμένες τάφρους. Οι επιπυθμένιες σήραγγες κατασκευάζονται στην ξηρά, και ποντίζονται στη θέση τους στο βυθό της θάλασσας, λίμνης ή ποταμού. Περιγράφονται η διαμόρφωση των λεκανών και οι τρόποι προκατασκευής των φορέων τους, καθώς και οι μέθοδοι ρυμούλκησης και τοποθέτησής τους. Πρόκειται και αυτή για ανοικτή εκσκαφή, που όμως πραγματοποιείται μέσα στο νερό.

Τέλος, στο κεφάλαιο 13 αναπτύσσεται η γεωτεχνική παρακολούθηση τόσον της βραχομάζας και των υπόγειων νερών όσον και της μηχανικής συμπεριφοράς της ίδιας της σήραγγας. Λόγω της αβεβαιότητας των γεωτεχνικών παραμέτρων και των απλουστεύσεων των αναλύσεων της συμπεριφοράς των υπογείων διανοίξεων, απαιτείται η γεωτεχνική παρακολούθηση τόσον κατά τη διάνοιξη, όσον και πριν και μετά από αυτήν. Προς τούτο χρησιμοποιούνται όργανα μέτρησης μήκους και πίεσης/δύναμης. Η παρακολούθηση συντελεί είτε στην επιβεβαίωση της ασφάλειας του έργου είτε στην απαίτηση τροποποίησης της μελέτης/κατασκευής, εφόσον οι προβλεπόμενες τιμές αποκλίνουν από τις μετρούμενες. Ειδικότερη περίπτωση μετρήσεων αποτελούν οι επιφανειακές καθιζήσεις, που δεν θα πρέπει να ξεπερνούν κάποια όρια προκειμένου να εξασφαλίζονται από ζημιές οι επίγειες κατασκευές. Αναπτύσσονται τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα όργανα και οι θέσεις τοποθέτησής τους.

Στο παράρτημα δίνονται χρήσιμα στοιχεία, όπως συνήθεις όροι που χρησιμοποιούνται στα κείμενα διάνοιξης σηράγγων, καθώς και σχετικό συνοπτικό λεξικό σε τέσσερεις γλώσσες.

Κεφάλαιο 1

Σύνοψη
Υπόγειες διανοίξεις πραγματοποιούνταν ήδη πριν από την ιστορική αρχαιότητα και θα εξακολουθούν να κατασκευάζονται εις το μέλλον. Ο τρόπος διάνοιξης εξελίσσονταν με βάση τα μέσα κάθε εποχής. Αναπτύσσεται περιληπτικά η ιστορική διαδρομή της σηραγγοποιίας από την αρχαιότητα μέχρι σήμερα, και οι τάσεις εξέλιξης της στο προσεχές μέλλον.

Προαπαιτούμενη γνώση
Μαθήματα: Υποστήριξη Υπογείων Έργων, Μηχανική των πετρωμάτων, Εξόρυξη πετρωμάτων. Χρήσιμη βιβλιογραφία: Sandström (1963).

1. Ιστορική εξέλιξη της σηραγγοποιίας

1.1 Ιστορικά στοιχεία

Παραδοσιακά, σήραγγα[2] ονομάζεται η οριζόντια ή παραοριζόντια τεχνητά σκαμμένη υπόγεια δίοδος. Στοά είναι κατασκευή όμοια με τη σήραγγα, με τη διαφορά ότι είναι ανοικτή προς την επιφάνεια μόνον κατά το ένα άκρο (Μπαρούνης, 1958). Είναι δύσκολο και έντεχνο τεχνικό ή μεταλλευτικό έργο που διανοίγεται σε βάθος που ποικίλει από πολύ μικρό έως πολύ μεγάλο, πάνω ή κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα ή και υποπυθμένια, και οι διαστάσεις του κυμαίνονται από πολύ μικρή έως πολύ μεγάλη. Σκοπός των τεχνικών υπογείων έργων είναι η χρησιμοποίηση του σκαμμένου χώρου, σε αντίθεση με τα μεταλλευτικά έργα στα οποία είναι η εκμετάλλευση του εξορυγμένου πετρώματος. Τα μεταλλεία είναι προσωρινά έργα που απασχολούν μόνιμες κοινότητες. Τα τεχνικά υπόγεια έργα είναι μόνιμα έργα που απασχολούν προσωρινά συνεργεία.

Η σηραγγοποιία για την εξόρυξη ορυκτών και παροχή νερού προηγήθηκε της καταγραμμένης ιστορίας. Μπορούμε επομένως να κάνουμε μόνο εικασίες για εκείνες τις πρώτες διανοίξεις. Όλοι οι αρχαίοι πολιτισμοί έχουν αφήσει πίσω παραδείγματα υπόγειων διανοίξεων. Η νοημοσύνη αυτών των πρώτων σηραγγάδων πριν 4 και πλέον χιλιετίες διάνοιξε στοές χρησιμοποιώντας ευρετικές μεθόδους, δίχως υποκείμενη τεχνολογία και εξειδικευμένα εργαλεία. Οι πρώτες σήραγγες διαμορφώθηκαν σε φυσικά σπήλαια, επιλέγοντας τύπους πετρωμάτων ικανούς για διάνοιξη, με επαρκή αντοχή και σφιχτή δομή ώστε να είναι ευσταθείς δίχως υποστήριξη. Μεγάλο μέρος των υπόγειων μεταλλευτικών εκμεταλλεύσεων πραγματοποιούνταν αρχικά σε τέτοια πετρώματα ακολουθώντας φλέβες με επιφανειακές εμφανίσεις.

1.2 Αρχαίες διανοίξεις

Η κατασκευή υπογείων στοών έχει τις ρίζες της στα ορυχεία της λιθικής εποχής. Οι πρώτες υπόγειες εξορύξεις πραγματοποιήθηκαν την μεταπαγετώδη ολόκαινο εποχή το 10000 χρόνια πΧ, με σκοπό την εξόρυξη κονδύλων πυριτόλιθου που χρησίμευαν στην κατασκευή όπλων και εργαλείων. Η υπόγεια εξόρυξη χαλκού ξεκίνησε το

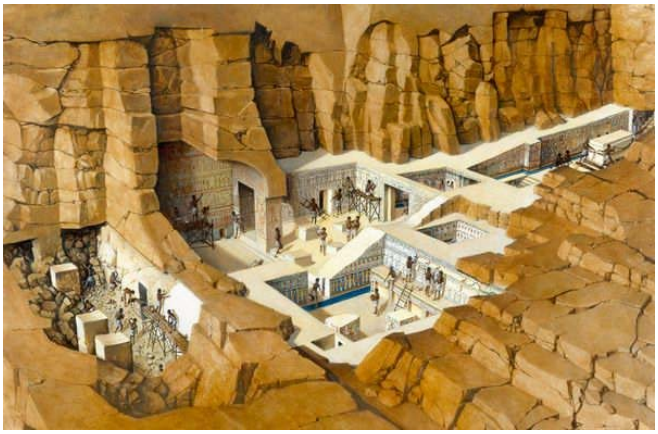
[2] *Η λέξη σήραγξ, σύμφωνα με το Ετυμολογικό λεξικό της αρχαίας Ελληνικής (J.B. Hofmann και μετάφρ. Α.Δ. Παπανικολάου στην Αθήνα 1974), παράγεται από το ρήμα **σαίρω**, "δεικνύω τους οδόντας σε ένδειξη θυμού ή αγανάκτησης", του οποίου βρισκόταν σε χρήση μόνο ο παρακείμενος σέσηρα. Βλ. και σάρμα = "σχισμή εδάφους, χάσμα". Έχουμε δηλ. την παραγωγή: σηρ <σαίρω>, -αγξ, πβ. φάραγξ.. Άλλη, παρακινδυνευμένη εκδοχή, που δίνεται από τον Ζερβαντωνάκη (2001), αναφέρει ότι η λέξη παράγεται από το ρήμα **ρήσσω**, που είναι ιωνικός τύπος του αττικού ρήματος ρήγνυμι, που σημαίνει διακόπτω, εν προκειμένω τη συνέχεια του πετρώματος. Σε αυτή τη λιγότερο πειστική εκτίμηση, η εξέλιξη της λέξης έχει ως εξής: ρήσσω > σήρ-αγξ (με γλωσσικό υπερβιβασμό). Με βεβαιότητα δεν μπορεί να πει κανείς τίποτε (Χαραλαμπάκης, 2006).*

~3500 πΧ στην Αρμενία, όταν είχαν εξαντληθεί τα επίγεια αποθέματά του. Η υπόγεια εκμετάλλευση σιδήρου άρχισε το ~1400 πΧ στην Αρμενία. Οι υπόγειες εκμεταλλεύσεις στη Λαυρεωτική ξεκίνησαν το 1500 πΧ. Η υπόγεια εκμετάλλευση των αλατωρυχείων του Hallstatt πραγματοποιούνταν από το ~1000πΧ. Στα Ρωμαϊκά μεταλλεία ήδη από το 500 πΧ εφαρμοζότανε στράγγιση και λειτουργούσε μηχανικός εξοπλισμός.

Πολλές από τις πιο εντυπωσιακές πρώτες σήραγγες εξυπηρετούσαν τελετουργικούς και θρησκευτικούς σκοπούς. Οι υπόγειες δίοδοι διέλευσης πεζών σχετίζονταν με την πρόσβαση σε θέσεις λατρείας θεών. Τέτοιες κατασκευάσθηκαν (Whittaker & Frith, 1990) στη Μάλτα το 3000 πΧ και στην Αίγυπτο (1000 πΧ). Η πρώτη γνωστή υποβρύχια σήραγγα χτίστηκε γύρω στο 2160 π.Χ. κάτω από τον ποταμό Ευφράτη (Σχήμα 1-1α) για να συνδέσει το βασιλικό παλάτι της Βασίλισσας Σεμίραμις με το ναό του αντίστοιχου Δία. Η σήραγγα είχε μήκος περίπου 920m, είχε διατομή 3.6m×4.5m, και επένδυση από τοιχοποιία με θολωτή αψίδα στεγανοποιημένη με ασφαλτικό κονίαμα. Ο ποταμός εκτράπηκε προκειμένου να επιτρέψει την κατασκευή με κοπή και επανεπίχωση. Κατά τη διάρκεια της Ακκαδικής ηγεμονίας στη Μεσοποταμία (2800-2200 πΧ), χτίστηκαν θολωτοί υπόνομοι για την αποχέτευση της πόλης με τοιχία από ψημένα τούβλα επενδυμένα με άσφαλτο.



(α) Σήραγγα κάτω από τον ποταμό Ευφράτη, 2160π.Χ.



(β) Αρχαίος αιγυπτιακός τάφος του Φαραώ Σέτι 1, 1366 π.Χ.

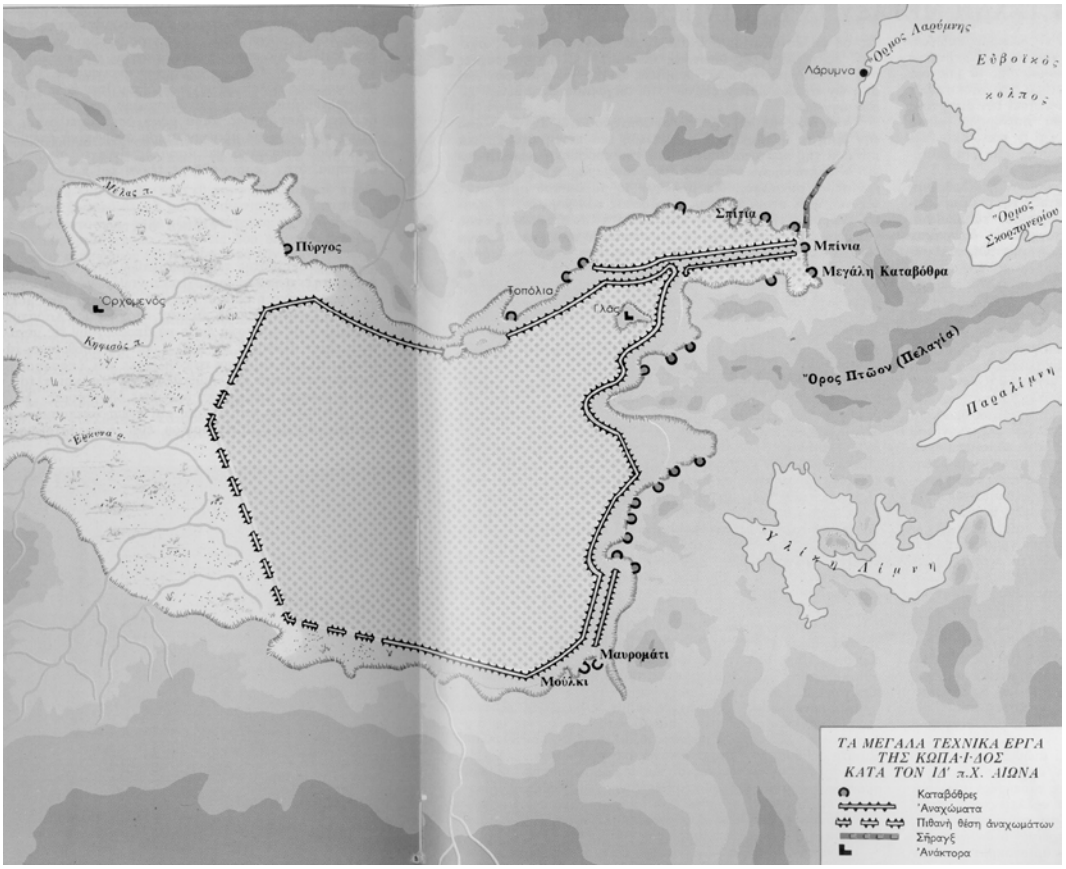
Σχήμα 1-1. Αρχαία υπόγεια έργα

Τάφοι και ναοί παρέχουν άλλα παραδείγματα σηραγγοποιίας. Οι βασιλικοί τάφοι στη Θήβα της Αιγύπτου και στην Ουρ στη Μεσοποταμία χρονολογούνται στο 2500 π.Χ., ενώ του Σέτι 1ου (Σχήμα 1-1β) και του Αμπού Σιμπέλ στην Αίγυπτο χρονολογούνται γύρω στο 1366 και το 1250 π.Χ., αντίστοιχα Αυτές οι σήραγγες ήταν σε ασβεστόλιθο, που απαιτούσε δεξιοτεχνία στη διαμόρφωσή του, αλλά δεν παρουσίαζε προβλήματα ευστάθειας. Τα σπήλαια της Ellora κοντά στη *Μούμπαϊ (*Βομβάη), με σήραγγες συνολικού μήκους πάνω από 9 km, εκσκάφθηκαν μεταξύ 200 και 600 μΧ, με καλέμι σε λεπτόκοκκο πυριγενές πέτρωμα.

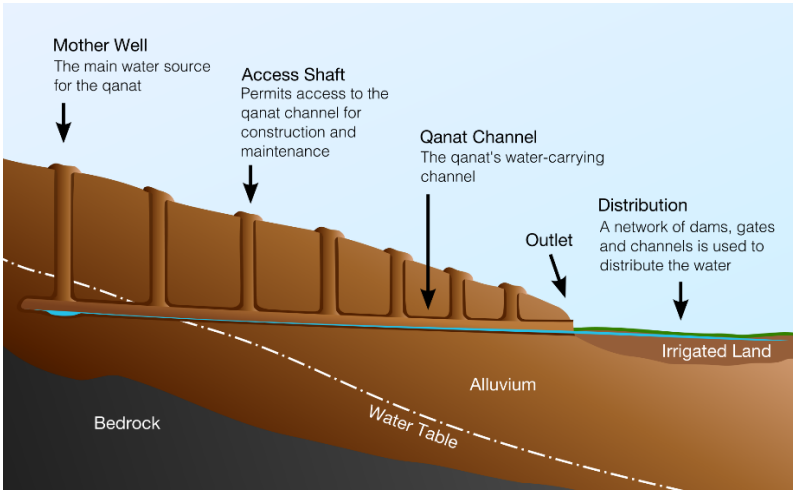
Οι αποστραγγιστικές σήραγγες της Κωπαΐδος (Σχήμα 1-2) χρονολογούνται σύμφωνα με κάποιους ερευνητές στο ΙΔ΄ πΧ αιώνα (Anon, 1970). Μια φημισμένη, αλλά όχι μοναδική, σήραγγα ύδρευσης του αρχαίου κόσμου είναι η σήραγγα Σιλωάμ γνωστή και ως σήραγγα Εζεκία. Το παλαιότερο τμήμα της πόλης της Ιερουσαλήμ, που χρονολογείται από το 2000 πΧ ή νωρίτερα είχε μια παροχή νερού από την πηγή Γκιών στα ανατολικά της πόλης. Στο 950 π.Χ. περίπου ο Σολομών σύνδεσε την πηγή με ένα ανοικτό κανάλι έξω από το τείχος της πόλης με την κολυμβήθρα του Σιλωάμ εντός του τοίχους. Κάτω από την απειλή της πολιορκίας από τους Ασσύριους, το 700 πΧ ο βασιλιάς Εζεκίας εξασφάλισε την παροχή νερού τροφοδοτώντας την μέσω μιας σήραγγας μήκους 533 m, που ακολουθούσε μια μακρύτερη ελικοειδή διαδρομή. Η σήραγγα έχει περίπου 1 m πλάτος και 2 m ύψος, αυξάνοντας σημαντικά το ύψος της κοντά στο στόμιο εξόδου. Η σήραγγα διανοίχθηκε και από τα δύο άκρα, και μια απότομη κάμψη Z κοντά στο μέσο του μήκους της πιθανώς σηματοδοτεί το σημείο ολοκλήρωσης.

Τα qanat (Σχήμα 1-3α) είναι μικρές υδαταγωγοί σήραγγες, μικρής παροχής που εκτείνονται από λόφο προς οικισμό σε κάποια απόσταση. Τροφοδοτούνται από πήγες κάτω από την επιφάνεια του εδάφους λόφων, και οι σήραγγες χρησιμεύουν ως αγωγοί σε πηγάδια ή σε επιφανειακή απορροή για την ικανοποίηση των απαιτήσεων για άρδευση. Κατασκευάστηκαν στην Αρμενία, την Περσία, τις Ινδίες, την Αίγυπτο, το Μαρόκο. Παρόμοιες σήραγγες βρίσκονται στην Κίνα που χρονολογούνται το 280 πΧ. Τα qanats της Μέσης Ανατολής, απαιτούν μια εσωτερική επένδυση για την παροχή στήριξης και ένα στεγανό ανάστροφο τόξο. Κατασκευάζονταν από κατακόρυφα φρέατα σε αποστάσεις κέντρων περίπου 50 m, και οι διαδρομές τους

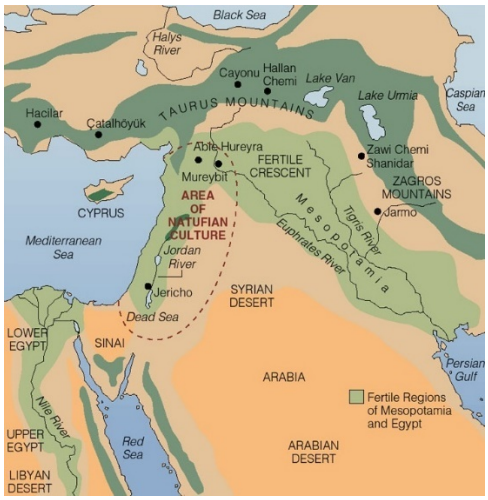
φανερωνόντουσαν από τα δαχτυλίδια των μπαζών γύρω από κάθε φρέαρ. Η ενδιάμεση πρόσβαση για νερό πραγματοποιούνταν μέσω κεκλιμένου φρέατος με σκαλιά. Κατασκευάζονταν από μια μικρή αυτοδύναμη ομάδα, που εξαρτιότανε από άλλους για τις απλές προμήθειες εργαλείων και υλικών. Χαρακτηριστικό είναι το qanat του Aleppo στη Συρία μήκους 7 μιλίων σε βάθος 90m, με κατακόρυφα φρέατα ανά ~50m για την ανέλκυση των μπαζών και τον εξαερισμό. Το παλαιότερο και μεγαλύτερο γνωστό qanat βρίσκεται στην ιρανική πόλη Gonabad (Hemphill, 2013) και μετά από 2700 χρόνια εξακολουθεί να παρέχει πόσιμο και γεωργικό νερό σε σχεδόν 40.000 ανθρώπους. Έχει μήκος 45 km, και το κύριο πηγάδι του έχει περισσότερο από 360m βάθος.



Σχήμα 1-2. Τα μεγάλα έργα της Κωπαΐδας κατά τον ΙΔ΄ π.Χ. αιώνα (Anon, 1970)



(α) Υδαταγωγός Qanat



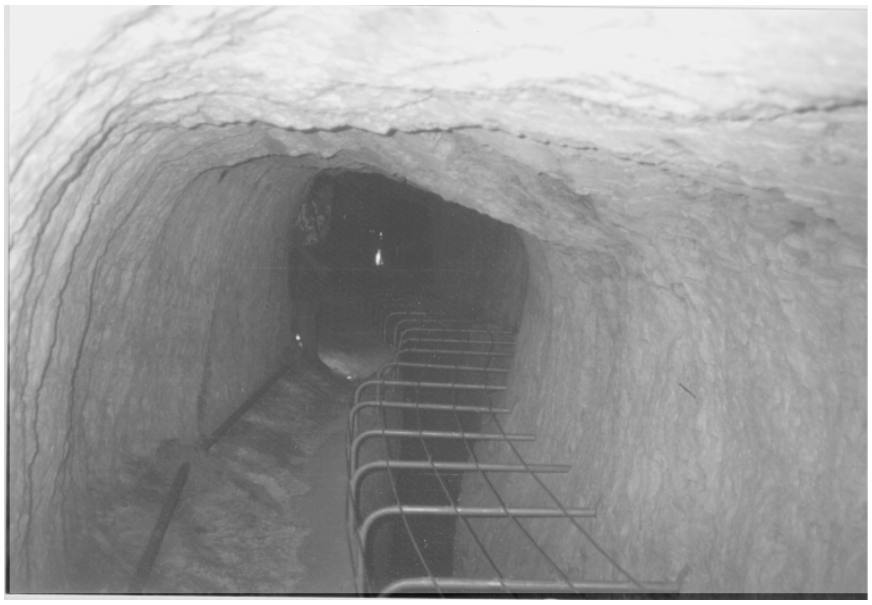
(β) Εύφορη ημισέληνος

Σχήμα 1-3. Qanat

Η ύδρευση σε αρκετές πόλεις της Εύφορης Ημισελήνου (Σχήμα 1-3β) έκανε χρήση αρχαίων υδαταγωγών, εν μέρει σε σήραγγες μεγάλου μήκους, όπως για παράδειγμα της Αρμπίλ στο Βόρειο Ιράκ, που

εξακολουθεί να υδρεύεται από ένα τέτοιο αγωγό, μήκους 20 km με μία σήραγγα της οποίας η λαξευτή πύλη εισόδου έχει πλάτος 2.7 m, με δάπεδο και τοίχους καλυμμένους από πέτρινες πλάκες.

Οι Έλληνες και οι Ρωμαίοι ήταν εξοικειωμένοι με τη διάνοιξη στοών προκειμένου να υποσκάπτουν τα τείχη κατά την πολιορκία πόλεων, καθώς και για κατάλληλα αντίμετρα. Πολλές στοές κατασκευάστηκαν επίσης ως μέρος υδραγωγείων για την παροχή νερού σε πόλεις, όπως η Αθήνα, που παραμένουν σε χρήση μέχρι σήμερα. Το Ευπαλίνειο όρυγμα, κατασκευάστηκε από τον Ευπαλίνο το 525 π.Χ. έπειτα από εντολή του τυράννου Πολυκράτη. Ήταν σήραγγα ύδρευσης (Σχήμα 1-4α) της πόλης της Σάμου (σημερινό Πυθαγόρειο) από πηγή πίσω από όρος. Είχε μήκος 1036 m, τετραγωνική άνω διατομή ~1.8 m × 1.8 m, με οροφή από ένα στρώμα ισχυρού ασβεστόλιθου. Προκειμένου να διατηρηθεί μία συνεχής κλίση του υδαταγωγού, ορύχθηκε μια τάφρος πλάτους 0.8 m σε βάθος από 1.5 m έως 8 m, σκεπασμένη με μια σειρά από λίθινες πλάκες πάνω από τον αγωγό. Αποτελεί την πρώτη διάνοιξη ορεινής σήραγγας από δύο στόμια, με συνάντηση στο μέσον της διαδρομής (Σταματιάδης, 1884), και λειτουργούσε για περίπου 1000 χρόνια ως υδραγωγείο.



(α) Ευπαλίνειο όρυγμα στο Πυθαγόρειο Σάμου (Σοφιανός, 1987)



(β) Οδική σήραγγα Pausilippo

Σχήμα 1-4. Ελληνικές και Ρωμαϊκές σήραγγες

Οι Ρωμαίοι επιδείξανε ικανότητα κατασκευής σημαντικού ανοίγματος τοξωτών σηράγγων επενδυμένων με λίθους. Το 359 π.Χ. κατασκευάσανε τη μήκους 2210 m σήραγγα για την αποστράγγιση της λίμνης Albanus. Η σήραγγα έχει πλάτος 1.5 m και ύψος 2.5 m, ορύχθηκε μέσα σε σκληρό ηφαιστειακό πέτρωμα χρησιμοποιώντας φρέατα ανά περίπου 45 m. Η αποστραγγιστική σήραγγα της Λίμνης Fucinus, μήκους 5500 m, πλάτους 2.5 m και ύψους 5 m, ορύχθηκε μεταξύ 41-51 μΧ από φρέατα εργασίας ανά 35 m, και επενδύθηκε με λαξευτή πέτρα όπου το έδαφος ήταν ασταθές. Κατασκευάσθηκαν επίσης πολλές σήραγγες οδοποιίας καθώς και κατακόμβες που χρησίμευαν ως τόποι λατρείας καθώς και για την ταφή των νεκρών. Την εποχή του Οκταβιανού-Αύγουστου (27 πΧ - 14 μΧ) κατασκευάστηκαν στα Απέννινα γύρω από τον κόλπο της Νάπολης, στην Κύμη και στο Puteoli, δύο οδικές σήραγγες πλάτους 3 m και ύψους 3.2 m, με μήκος 1000 m και 700 m αντίστοιχα (Wood, 2000). Η οδική σήραγγα που κατασκευάσθηκε στο Pausilippo (Σχήμα 1-4β) μεταξύ Νάπολης και Pozzuoli το 36 πΧ, μήκους 1450m, με πλάτος 7.5m και ύψος 9m (Sandström, 1963), μπορεί να συγκριθεί σε μέγεθος με σύγχρονες διανοίξεις. Την περίοδο αυτή αρχίζει ο διαχωρισμός μεταξύ τεχνικών και μεταλλευτικών σηράγγων. Οι ρωμαϊκές σήραγγες χτίζονταν συνήθως από σκλάβους ή αιχμαλώτους πολέμου και απαιτούσαν τυποποιημένες διαδικασίες για την οργάνωση του μεγάλου αριθμού ανθρώπων, με συνέπεια να παρέχουν ελάχιστα περιθώρια για πρωτοβουλία ή καινοτομία.

1.2.1 Εμπόριο και σήραγγες από το 17ο μέχρι το 19ο αιώνα

Η κατάρρευση της ρωμαϊκής αυτοκρατορίας προκάλεσε την έλλειψη ζήτησης για διάνοιξη τεχνικών σηράγγων στην Ευρώπη για αρκετούς αιώνες, αν και συνεχίστηκαν οι μικρής κλίμακας εξορύξεις και οι σήραγγες για στρατιωτικούς σκοπούς (Σχήμα 1-5). Σήραγγες διανοίγονταν κάτω από τα τείχη της πόλης ή κάτω από το τις γραμμές του εχθρού, για να τοποθετηθούν εκρηκτικές ύλες που θα έθραυαν τα τείχη ή θα διοχέτευαν στρατιώτες στα μετόπισθεν του εχθρού. Λίγο μετά τον 19ο αιώνα, στις αρχές Ιανουαρίου του 1917 (Hemphill, 2013), ο Βρετανός στρατηγός Sir Herbert Plumer διέταξε την όρυξη 20 στοών κάτω από γερμανικές γραμμές στο Messines. Για τους επόμενους πέντε μήνες περισσότερα από 8000m στοών σκάφτηκαν κάτω από τις εχθρικές θέσεις και τοποθετήθηκαν 600 τόνοι εκρηκτικών από ορύχους που προσέλαβε ο στρατός. Η ταυτόχρονη ανατίναξη των εκρηκτικών έλαβε χώρα στις 7 Ιουνίου. Η έκρηξη, η οποία ήταν τόσο δυνατή που ακούστηκε στο Λονδίνο, σκότωσε περίπου 10.000 ανθρώπους. Ο Széchy (1967) αναφέρει την όρυξη μίας αποστραγγιστικής σήραγγας μήκους 5.6 km το 1400 μΧ στο ορυχείο Biber στην Ουγγαρία. Οι τεχνικές της ξύλινης υποστήριξης και των μεθόδων εξόρυξης προέρχονταν σε μεγάλο βαθμό από την πρακτική στα μεταλλεία (Agricola, 1556).



Σχήμα 1-5. Μυστική δίοδος της κάστρου Bran

1.2.1.1 Οι διώρυγες

Με την αναγέννηση, η ανάπτυξη της βιομηχανίας και του εμπορίου απαιτεί μέσα μεταφοράς πρώτων υλών και αγαθών. Αρχικά, οι μεταφορές γίνονταν με πλωτά μέσα στα ποτάμια, η ένωση των οποίων απαιτούσε την

κατασκευή διωρύγων. Με την ανάπτυξή τους η κατασκευή τμημάτων τους σε σήραγγες γινότανε επιτακτική, καθώς οι τελευταίες μειώνανε και τις ανάγκες σε θυροφράγματα. Ο Leonardo da Vinci είχε ήδη κάνει πολλές προτάσεις, οι οποίες δεν πραγματοποιήθηκαν, για διώρυγες ναυσιπλοΐας, συμπεριλαμβανομένης της σύνδεσης μεταξύ των ποταμών Garonne και Aude, που στη συνέχεια κατασκευάστηκε ως διώρυγα Languedoc. Αυτή η διώρυγα των δύο θαλασσών όπως ονομαζότανε, στόχευε στο να ενώσει τους δύο ποταμούς και μέσω αυτών τον ατλαντικό με τη μεσόγειο (Sandström, 1963). Στη θέση Malpas της διώρυγας, το 1679-1681 επί Λουδοβίκου XIV, αντί να παρακαμφθεί ο ορεινός όγκος κατασκευάσθηκε μέσα σε τόφφους σήραγγα με μήκος 157m και διατομή 6.7 × 8.2m. Για τη διάνοιξή της χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά πυρίτιδα για την ανατίναξη του βράχου.

Κατά το δέκατο έβδομο αιώνα, οι μελετητές στη Γαλλία των σηράγγων των διωρύγων αρχίσαν να εφαρμόζουν τις αρχές της γραφικής στατικής για την κατασκευή σταθερών αψίδων. Η μελέτη της ξυλείας υποστήριξης βασίστηκε στην εμπειρία στα ορυχεία. Η κατασκευή των διωρύγων και των σηράγγων στις θέσεις που απαιτούνταν, συνεχίσθηκε με ταχύτατους ρυθμούς στην Ευρώπη και αργότερα στην Αμερική μέχρι και τις αρχές του 19ου αιώνα. Οι διώρυγες στην Αγγλία κατασκευάζονταν με ιδιωτική χρηματοδότηση επιχειρήσεων διωρύγων με ελάχιστο κόστος και στην υπόλοιπη Ευρώπη με κρατική χρηματοδότηση και μεγαλύτερες διαστάσεις.



Σχήμα 1-6. Σήραγγα Chirk στη διώρυγα Ellesmere που ολοκληρώθηκε το 1802

Ιδιαίτερα μεγάλος αριθμός από διώρυγες κατασκευάζεται κατά τον 18ο αιώνα στην Αγγλία. Η πρώτη αγγλική σήραγγα διώρυγας ήταν του Bridgewater, μεταξύ Worsley και Manchester. Η σήραγγα στο ένα άκρο της εισέρχεται στο ανθρακωρυχείο του Worsley, έτσι ώστε οι μαούνες να φορτώνονται απευθείας μέσα στο ορυχείο. Στην άλλη πλευρά της διώρυγας, στο Manchester, η διώρυγα κατέληγε υπόγεια και συνδεόταν με την επίγεια επιφάνεια με φρέαρ. Ορύχθηκε το 1761 και στη συνέχεια επεκτάθηκε. Η κατασκευή της σήραγγας επέτυχε την πλήρη αποφυγή θυροφραγμάτων και ως εκ τούτου την απρόσκοπτη μεταφορά του άνθρακα με αποτέλεσμα τη μείωση της τιμής του στο μισό. Σηματοδότησε την έναρξη της εποχής των διωρύγων, με πολυάριθμες σήραγγες στο επεκτεινόμενο δίκτυο διωρύγων (Σχήμα 1-6). Στις Ηνωμένες Πολιτείες οι δύο πρώτες σήραγγες κατασκευάσθηκαν στη διώρυγα Union της Pennsylvania στις θέσεις Schuylkill και Lebanon το 1818 και το 1826 αντίστοιχα. Η κατασκευή των διωρύγων κατά τις δεκαετίες αυτές παρήγαγε μια νέα τάξη

ανθρώπων, τους πολιτικούς μηχανικούς, που διαχωρίστηκαν από τους στρατιωτικούς μηχανικούς (Sandström, 1963).

1.2.1.2 Οι εθνικοί σιδηρόδρομοι

Η απαίτηση ύπαρξης θυροφραγμάτων αλλά και η αδυναμία διέλευσης των διωρύγων από τις καταλληλότερες θέσεις φόρτωσης και εκφόρτωσης ώθησε στην κατασκευή των σιδηροδρόμων ως εναλλακτικών μέσων μεταφοράς. Η χάραξη τους επέτρεπε λιγότερο αυστηρούς κανόνες σχεδιασμού, αν και εξακολουθούσε να απαιτεί ελαχιστοποίηση των κλίσεων και των αποστάσεων, κάτι που καθιστούσε αναγκαία την κατασκευή γεφυρών και σηράγγων προκειμένου να επιτυγχάνεται η διέλευση στις περιοχές κοιλάδων και ορεινών όγκων. Η πρώτη σιδηροδρομική σήραγγα κατασκευάσθηκε το 1826 στη Γαλλία.



Σχήμα 1-7. Όψη του 1833 της σήραγγας Wapping (Edge Hill) φωτισμένης από λάμπες γκαζιού. Έχει μήκος 2030 m και κατασκευάστηκε για τη μεταφορά αγαθών μεταξύ της αποβάθρας του Λίβερπουλ και του Μάντσεστερ, στο πλαίσιο της προγραμματισμένης σιδηροδρομικής γραμμής. Ήταν η πρώτη σήραγγα στον κόσμο που διανοίχθηκε κάτω από την πόλη.

Εν τούτοις η σημαντικότερη ανάπτυξη των σιδηροδρόμων πραγματοποιείται στην Αγγλία, την πλουσιότερη χώρα της εποχής. Το 1830 αρχίζει η κατασκευή της σιδηροδρομικής γραμμής μεταξύ Liverpool και Manchester (Σχήμα 1-7) που απαιτεί την κατασκευή δύο σηράγγων. Έκτοτε, σιδηρόδρομοι και σήραγγες αναπτύσσονται με ταχύτατους ρυθμούς στην Αγγλία, με πιο διάσημη τη σήραγγα Box που διανοίχτηκε με μεγάλες δυσκολίες από εισρέοντα νερά, μεταξύ 1836 και 1851, μέσα σε ωόλιθους, μάργες, ιλύες και αργίλους.

Στην ηπειρωτική Ευρώπη, τη δεκαετία του 1830 κατασκευάζονται σιδηροδρομικές σήραγγες στο Βέλγιο, στη Γαλλία και στη Γερμανία, ενώ στην Ελβετία η πρώτη σήραγγα κατασκευάσθηκε στο Hauenstein μεταξύ 1853-58. Στην Αυστρία μέχρι το 1856 έχουν κατασκευασθεί εξήντα σήραγγες και στην Ιταλία 10km

σήραγγες. Τέλος, στις Ηνωμένες Πολιτείες η πρώτη σήραγγα κατασκευάστηκε στην Pennsylvania μεταξύ 1831-33, και μέχρι το 1850 είχαν κατασκευαστεί 29 σιδηροδρομικές σήραγγες.

1.2.1.3 Οι πρώτες αλπικές σήραγγες

Το 1850 τα εθνικά συστήματα σιδηροδρόμων βορείως των Άλπεων, δηλαδή της Γερμανίας, της Γαλλίας, της Ελβετίας και εν μέρει της Αυστρίας, είχαν συνδεθεί μεταξύ τους. Στην Ιταλία οι σιδηρόδρομοι αναπτύσσονταν επίσης παρόλη την πολιτική διαίρεση και τις επαναστατικές εξεγέρσεις. Μεταξύ των εμβρυακών αυτών βορείων και νοτίων συστημάτων εμπόδιο για τη σύνδεση ήταν οι μεγάλοι ορεινοί όγκοι των Άλπεων. Η σύνδεσή τους απαιτούσε την κατασκευή σηράγγων μήκους πάνω από 10km, που παρουσίαζαν πολλές δυσκολίες και που για τη διάνοιξή τους απαιτούνταν η εφαρμογή ιδιαίτερα σημαντικών καινοτομιών (Kovári & Fechtig, 2000).

Επανάσταση στη διάνοιξη σηράγγων σε σκληρά πετρώματα αποτέλεσε η πρώτη χρήση εκρηκτικών για την εξόρυξη σε μεταλλεία στη Γερμανία το δέκατο έβδομο αιώνα και η χρήση πιεσμένου αέρα για τις αερόσφυρες το 1861. Προηγουμένως, οι μέθοδοι όρυξης ήταν επίπονες και αργές , ελάχιστα βελτιωμένες σε σχέση με αυτές που εφάρμοζαν οι Αιγύπτιοι και αργότερα οι Ρωμαίοι.



Σχήμα 1-8. Είσοδος από την Ιταλική πλευρά της σιδηροδρομικής σήραγγας Frejus.

Η πρώτη σήραγγα που διανοίχτηκε ήταν του Frejus (Mont Cenis) (Σχήμα 1-8) που έχει μήκος 13.7 km και βρίσκεται σήμερα μεταξύ Ιταλίας και Γαλλίας. Η διάνοιξη που άρχισε το 1857 πραγματοποιήθηκε με τη βελγική μέθοδο από δύο μέτωπα και για την εκσκαφή της χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά πυρίτιδα και *αεροσυμπιεστής και αερόσφυρα* για την όρυξη των διατρημάτων. Επάνω σε φορείο φέρονταν 4 έως 9 αερόσφυρες. Η κατασκευή της σήραγγας ολοκληρώθηκε το 1871, αλλά ο κατασκευαστής της Sommeiller δεν ήταν παρόν στην τελετή των εγκαινίων καθώς είχε πεθάνει μερικούς μήνες πριν από υπερκόπωση. Την ίδια εποχή στις Ηνωμένες Πολιτείες διανοίχτηκε με τη χρήση νιτρογλυκερίνης η σήραγγα Hoosac.

Αμέσως μετά, το 1872, άρχισε η διάνοιξη της σήραγγας του Gotthard στην Ελβετία (Kovari & Fechtig, 2000), που έχει μήκος 15km και μέγιστο βάθος υπερκειμένων 1800m. Για την εξόρυξή της χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά *δυναμίτης*. Το έργο με μεγάλες δυσκολίες περατώθηκε το 1882. Η κατασκευάστρια εταιρεία όμως καταστράφηκε οικονομικά, και εκατοντάδες εργαζομένων μεταξύ των οποίων και ο ίδιος ο ανάδοχος, μηχανικός Favre (1826-1879), πέθαναν πριν την ολοκλήρωσή του έργου.

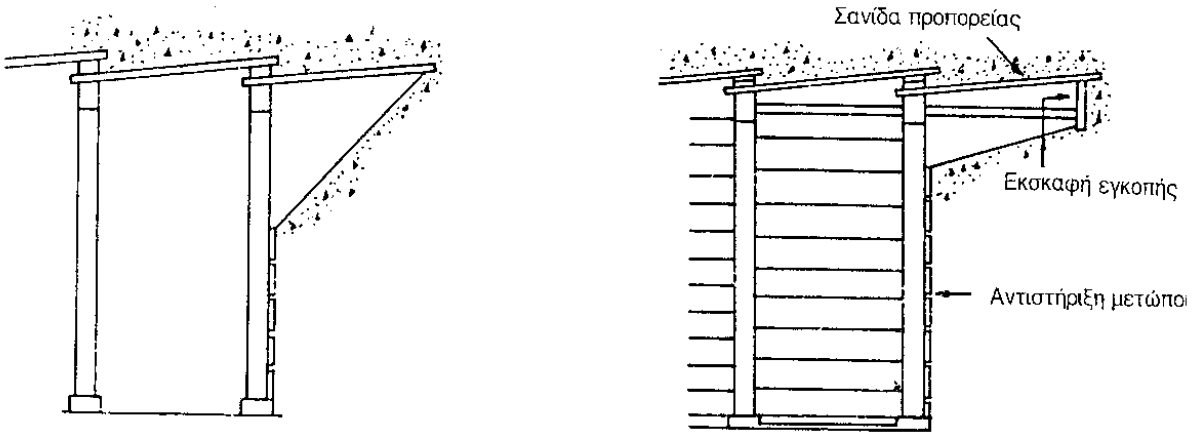
Η σήραγγα του Arlberg μήκους 10.3km, η οποία ενώνει την Αυστρία με την Ελβετία, άρχισε να κατασκευάζεται το 1880 και περατώθηκε το 1884. Διανοίχτηκε με την παλαιά Αυστριακή μέθοδο και μεταξύ των καινοτομιών που χρησιμοποιήθηκαν ήσαν *βελτιωμένες μηχανές διάτρησης και η χρήση ηλώσεων* για τη στήριξη των πετρωμάτων.

Αμέσως μετά, το 1898, άρχισε να κατασκευάζεται η μήκους 19.8 km και μέγιστου βάθους υπερκειμένων 2150 m σήραγγα του Simplon (Kovari & Fechtig, 2000) μεταξύ Ιταλίας και Ελβετίας. Είναι *δίδυμη* σήραγγα (αντί για τις μέχρι τότε διπλής τροχιάς μονές σήραγγες), εκ των οποίων ο πρώτος κλάδος ολοκληρώθηκε το 1906 και ο δεύτερος τέθηκε σε λειτουργία το 1921. Η ενέργεια για τη διάνοιξη της σήραγγας παράγονταν από υδροηλεκτρικό έργο που κατασκευάστηκε επί τούτοις. Εφαρμόστηκε η παλαιά Αυστριακή μέθοδος και κατά την κατασκευή της αντιμετωπίσθηκαν θερμοκρασίες πετρώματος και πηγών νερού μέχρι και 55.4°C. Επίσης οι εξαιρετικά μεγάλες πιέσεις οδήγησαν σε συμπεριφορά πετρώματος εκρηκτική και συνθλίβουσα, που αντιμετωπίσθηκαν με την τοποθέτηση χαλύβδινων πλαισίων. Για πρώτη φορά συσχετίστηκε η συνθλίβουσα συμπεριφορά της βραχομάζας με τη δημιουργία πλαστικής ζώνης πέριξ του υπόγειου ανοίγματος, και η απομείωση της έντασης στο πέτρωμα με τη σύγκλιση της σήραγγας.

Η σήραγγα του Lötschberg (Kovari & Fechtig, 2000) που έχει μήκος 16km και μέγιστο ύψος υπερκειμένων 1600m είναι η τελευταία από τις πρώτες μεγάλες αλπικές σήραγγες. Κατασκευάσθηκε μεταξύ 1906-13 με την παλαιά Αυστριακή μέθοδο και αντιμετώπισε ιδιαίτερα προβλήματα εισροής νερών.

1.2.2 Τεχνικές διάνοιξης σε ανεξάρτητα τμήματα

Η κατασκευή των σηράγγων στις διάφορες χώρες απαίτησε την ανάπτυξη τεχνοτροπιών. Αυτές διέφεραν με τις γεωτεχνικές συνθήκες και την τεχνική παράδοση κάθε περιοχής και εξελίχθηκαν σε διάφορα μέρη της Ευρώπης, κυρίως για τις σήραγγες διωρύγων και τις πρώτες σιδηροδρομικές σήραγγες, λαμβάνοντας περιφερειακές ονομασίες και χαρακτηριστικά προσαρμοσμένα στις συνθήκες της περιοχής (Σοφιανός, 2001). Έτσι αναπτύχθηκαν η αγγλική, η γερμανική, η (παλαιά) αυστριακή, η βελγική, η αμερικανική, η ιταλική κ.α. τεχνοτροπίες. Οι μέθοδοι αυτές απαιτούσαν πολλαπλά μέτωπα εκσκαφής, προσωρινή υποστήριξη με ξυλοδεσία και μόνιμη λίθινη στήριξη. Στο Σχήμα 1-9 φαίνεται ο τρόπος διάνοιξης των μεμονωμένων στοών σε συνεκτικά ή μη συνεκτικά εδάφη. Παρακάτω παρουσιάζονται οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες τεχνικές τμηματικής διάνοιξης σηράγγων.



Σχήμα 1-9. Διάνοιξη στοάς σε συνεκτικό (αριστερά) και σε μη συνεκτικό (δεξιά) έδαφος (πηγή).

1.2.2.1 Η Γερμανική τεχνική (πυρήνα)

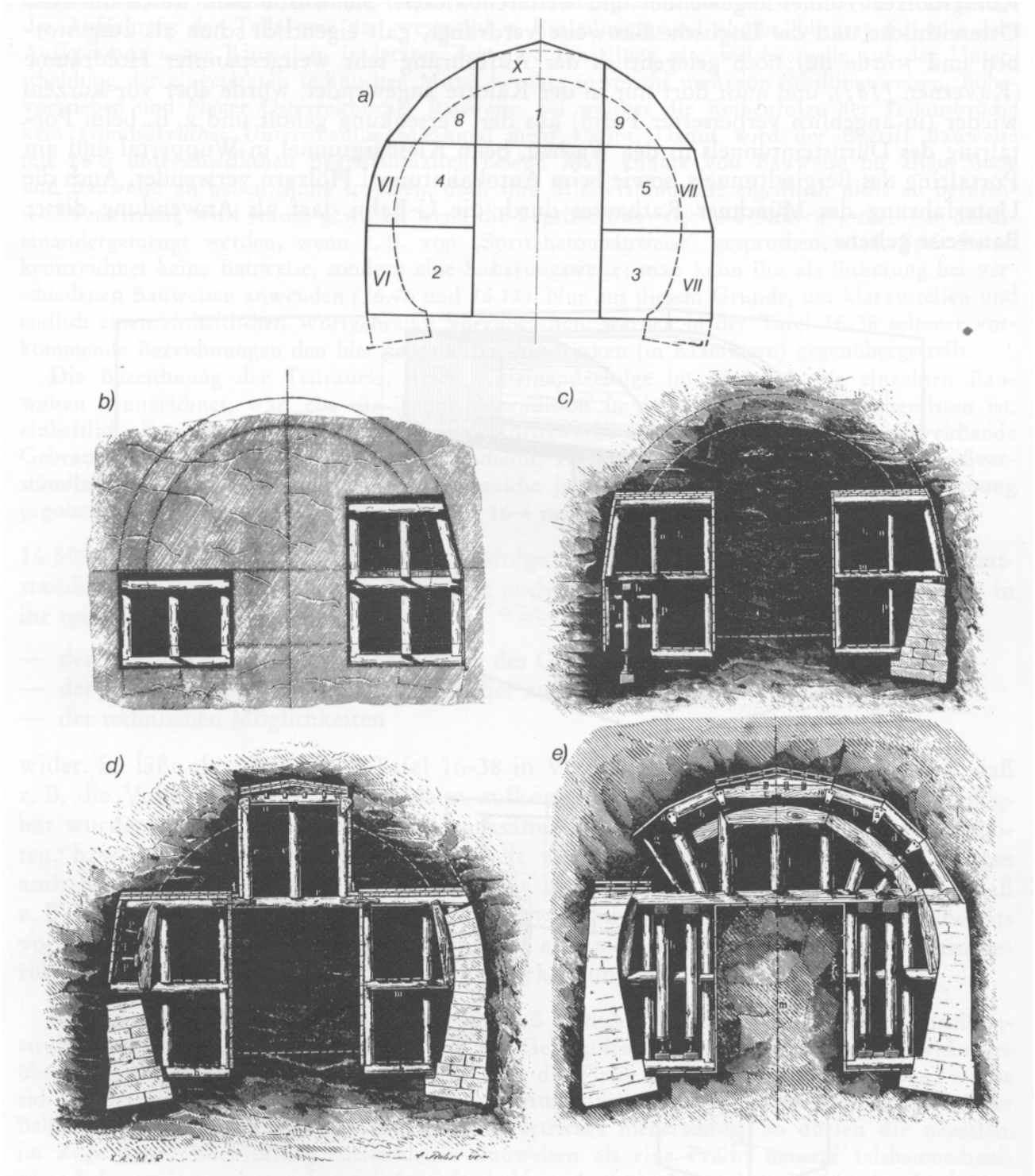
Το Γερμανικό σύστημα (Σχήμα 1-10), που ήταν ο πρόδρομος του συστήματος πολλαπλών στοών, παρέχει μια σειρά από κιβωτιοειδείς στοές εντός των οποίων κατασκευάζονται τα διαδοχικά τμήματα των πλευρικών τοιχωμάτων της σήραγγας από τα βάθρα θεμελίωσης προς τα πάνω. Η μέθοδος εξαρτάται από την ικανότητα του κεντρικού πυρήνα να αντιστέκεται χωρίς υπερβολική μετατόπιση στην πίεση από τα πλευρικά τοιχώματα, στην παροχή υποστήριξης στη στέψη πριν από την ολοκλήρωση της αψίδας και στην εξασφάλιση της ευστάθειας κατά την τμηματική επέκταση του ανάστροφου τόξου.

Η πρώτη σημαντική σήραγγα που διανοίχθηκε σε μαλακή γεωμάζα, μέσα σε αμμοχάλικα, είναι η σήραγγα Tronquoy στη μήκους 100km διώρυγα St Quentin, στη Γαλλία επί Ναπολέοντος το 1803 (Müller, 1984). Το πλάτος της ήταν 8m και το μήκος της 1075m. Η μέθοδος κατασκευής βασιζότανε στην όρυξη διαδοχικών μετώπων για την κατασκευή του τόξου πέριξ της σήραγγας ξεκινώντας από την βάση· ήταν ένας πρόδρομος του Γερμανικού συστήματος. Παραδόξως, η μέθοδος αυτή αντί για γαλλική ονομάζεται γερμανική. Στη Γερμανία η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1837 για την πρώτη σήραγγα γερμανικού σιδηροδρόμου, την του Könnigsdorf στη γραμμή Köln – Aix la Chapelle, σε εξαιρετικά δύσκολες συνθήκες μέσα σε υδροφόρες άμμους. Σύντομα αντικαταστάθηκε από την Αγγλική ή την παλαιά Αυστριακή μέθοδο. Βασικές αρχές της μεθόδου είναι η αποφυγή μεγάλων χώρων εκσκαφής, η στήριξη της βραχομάζας γύρω από τις επιμέρους εκσκαφές σε ένα πυρήνα πετρώματος που παραμένει για να σκαφτεί τελευταίος, η άμεση τοποθέτηση της προσωρινής υποστήριξης κάθε επιμέρους στοάς, η άμεση τοποθέτηση της μόνιμης υποστήριξης (λιθοδομής) πάνω σε δομημένα τμήματα, και η εξόρυξη του κεντρικού πυρήνα σε μία φάση.

Πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η εξασφάλιση της πρόγνωσης της ποιότητας του πετρώματος στη στοά προπορείας, η επίτευξη μικρών καθιζήσεων λόγω της άμεσης στήριξης μικρών εκσκαφών πάνω στον πυρήνα, η τοποθέτηση του θόλου του άνω τμήματος σε ισχυρή μη υποχωρούσα στήριξη, και η οικονομική εξόρυξη του πυρήνα. Μειονεκτήματα της μεθόδου είναι η χαλάρωση της βραχομάζας, η εργασία μέσα σε στενούς χώρους, και το υψηλό κόστος της διάνοιξης των στοών που δεν αντισταθμίζεται από το χαμηλό κόστος της διάνοιξης του πυρήνα.

Η μέθοδος δεν μπορεί να εφαρμοσθεί από γεωμηχανική άποψη σε συνθλίβοντα πλάστιμα πετρώματα στα οποία ο πυρήνας κάτω από την υποστήριξη υποχωρεί καθώς και σε εύθρυπτα ή κορεσμένα πετρώματα. Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοσθεί με χρήση ειδικών μέτρων, χωρίς όμως να συνιστάται, σε πετρώματα με δυνατότητα χαλάρωσης, σε πετρώματα με μη ευνοϊκή κλίση των διακλάσεων, σε δύσκαμπτα αλλά αδύναμα πετρώματα και σε ισχυρό εντατικό πεδίο.

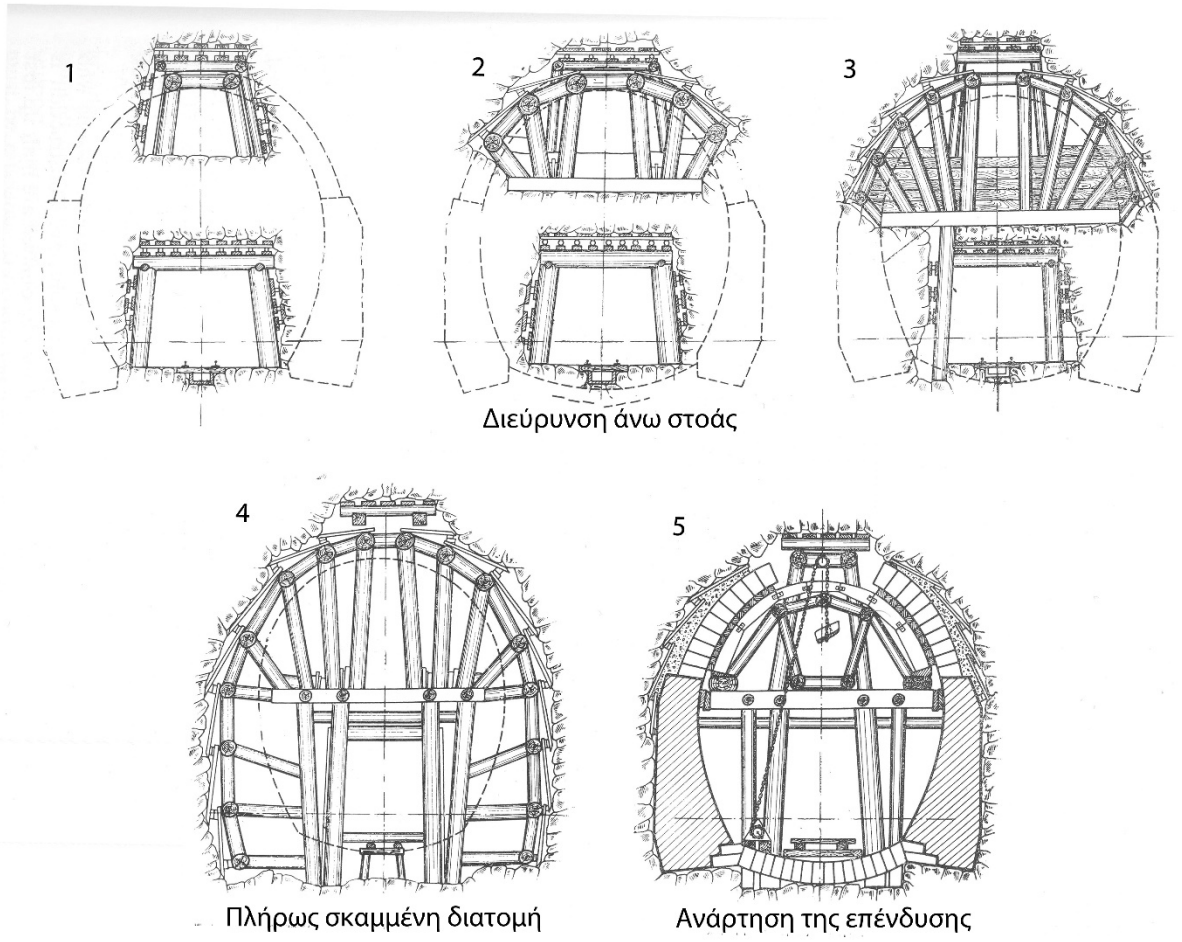
Η μέθοδος είναι κατάλληλη για σταθερό πέτρωμα· μπορεί να είναι αποτελεσματική ακόμη και σήμερα σε μικρά βάθη και μαλακά πετρώματα ή συνεκτικά εδάφη και σε σταθερό πέτρωμα θόλων μεγάλου ανοίγματος στο άνω τμήμα υπογείων θαλάμων. Χρησιμοποιήθηκε τελευταία κατά την κατασκευή τμήματος της υποθαλάσσιας σήραγγας Seikan.



Σχήμα 1-10. Τεχνική του πυρήνα – Φάσεις κατασκευής (Rziha, 1874).

1.2.2.2 Η Αγγλική τεχνική (δοκού στέψης)

Το Αγγλικό σύστημα (Σχήμα 1-11) ξεκινά από μια κεντρική άνω στοά η οποία επιτρέπει την ανύψωση στη θέση τους δύο ξύλινων δοκών στέψης, των οποίων τα πίσω άκρα υποστηρίζονται σε ένα ολοκληρωμένο μήκος επένδυσης και τα εμπρός άκρα υποστηρίζονται εντός της κεντρικής στοάς. Η διεύρυνση της στοάς επιτρέπει την πρόσθετη ανέγερση δοκών στην περίμετρο του μετώπου και την τοποθέτηση σανίδων μεταξύ κάθε ζεύγους που συγκρατούν το περιβάλλον έδαφος.



Σχήμα 1-11. Αγγλική τεχνική – Φάσεις κατασκευής (Széchy , 1967).

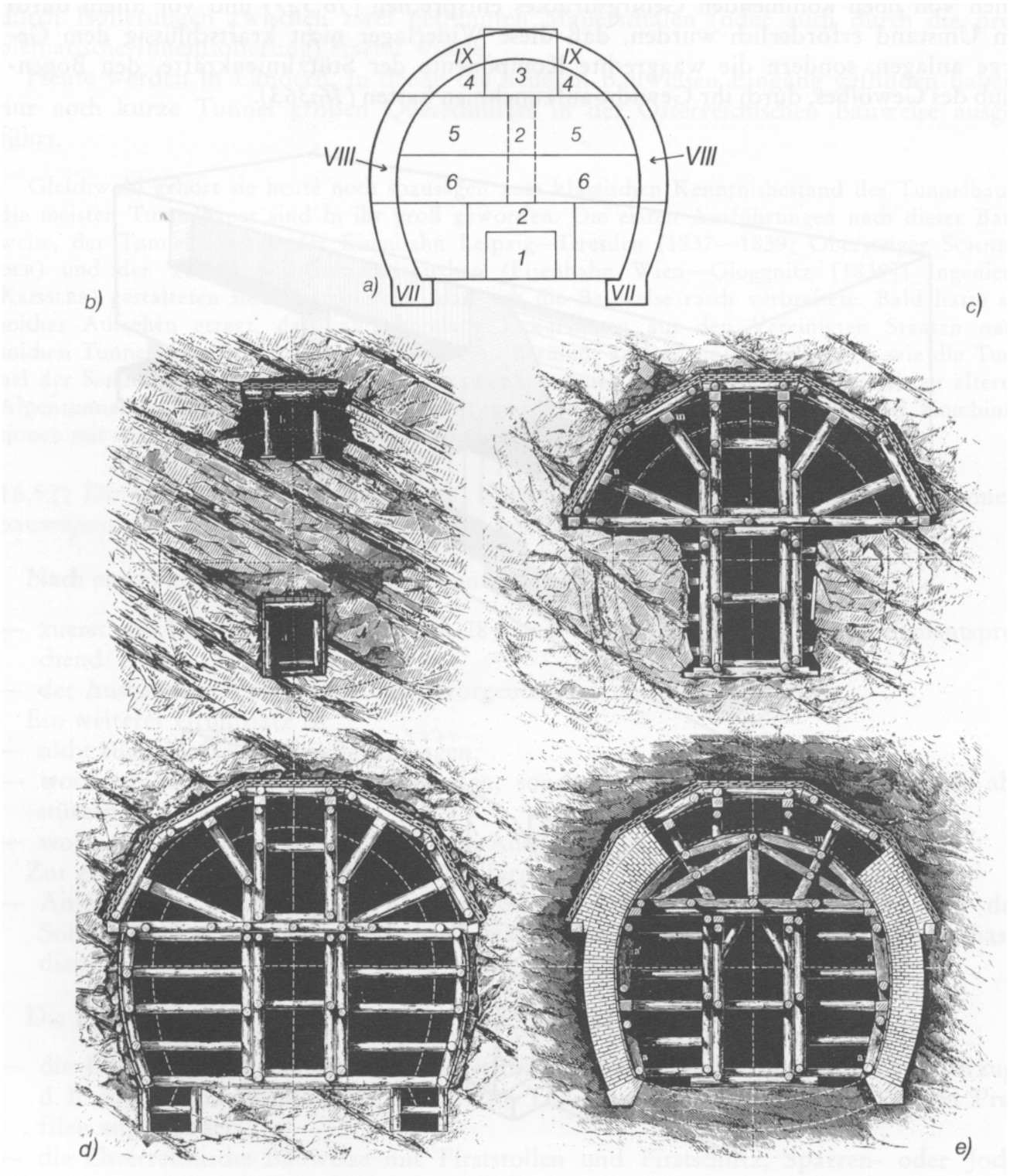
Το σύστημα είναι οικονομικό σε ξυλεία, επιτρέπει την κατασκευή του τόξου της σήραγγας με πλήρη εκσκαφή μετώπου, είναι κατάλληλο για μια ευρεία ποικιλία συνθηκών του εδάφους, αλλά δέχεται σχετικά χαμηλές πιέσεις εδάφους. Οι σήραγγες των αγγλικών διωρύγων έθεσαν τα πρότυπα για την κατασκευή σηράγγων στο βράχο και σε ασθενέστερη γεωμάζα, χρησιμοποιώντας την αγγλική μέθοδο.

1.2.2.3 Η παλαιά Αυστριακή τεχνική (εγκάρσιας δοκού)

Το Αυστριακό σύστημα απαιτεί την κατασκευή μιας ισχυρής κεντρική στοάς βάσης πάνω από την οποία κατασκευάζεται μια στοά στέψης. Η ξυλοδεσία ολόκληρου του μετώπου αντιστηρίζεται στη συνέχεια στις δύο κεντρικές στοές, με διαμήκεις σανίδες εδραζόμενες στις ξύλινες δοκούς στηριζόμενες στα ξύλινα πλαίσια. Καθώς προχωρά η επένδυση, αντιστηρίζεται η ξυλοδεσία σε κάθε μήκος ώστε να διατηρείται η ευστάθεια. Η μέθοδος ήταν ικανή να αντέχει υψηλές πιέσεις έδαφους, αλλά ήταν ιδιαίτερα απαιτητική σε ξυλεία.

Με τη μέθοδο αυτή, που χρησιμοποιήθηκε πολύ στην Κεντρική Ευρώπη, αποφεύχθηκαν τα μειονεκτήματα της βελγικής μεθόδου (Δρανδάκης, -). Οι επιμέρους ανεξάρτητες διανοίξεις της μεθόδου

φαίνονται στο Σχήμα 1 12. Αρχικά κατασκευάζεται και υποστηρίζεται η στοά της στέψης. Η εκσκαφή συνεχίζει με τη διάνοιξη στοών, με σειρά από πάνω προς τα κάτω, που υποστηρίζονται άμεσα. Η μέθοδος έχει ατολμία για μεγάλες μερικές εξορύξεις και η στήριξη γίνεται κατά το δυνατόν γρήγορα στο δάπεδο. Η τελική υποστήριξη (λιθοδομή) κατασκευάζεται μετά το τέλος της εξόρυξης από κάτω προς τα πάνω. Τέλος μία στοά προπορείας στη βάση της σήραγγας χρησιμοποιείται ως οδός μεταφοράς η οποία λειτουργεί και ως στραγγιστήριο.



Σχήμα 1-12. Παλαιά Αυστριακή τεχνική – Φάσεις κατασκευής (Rziha, 1874).

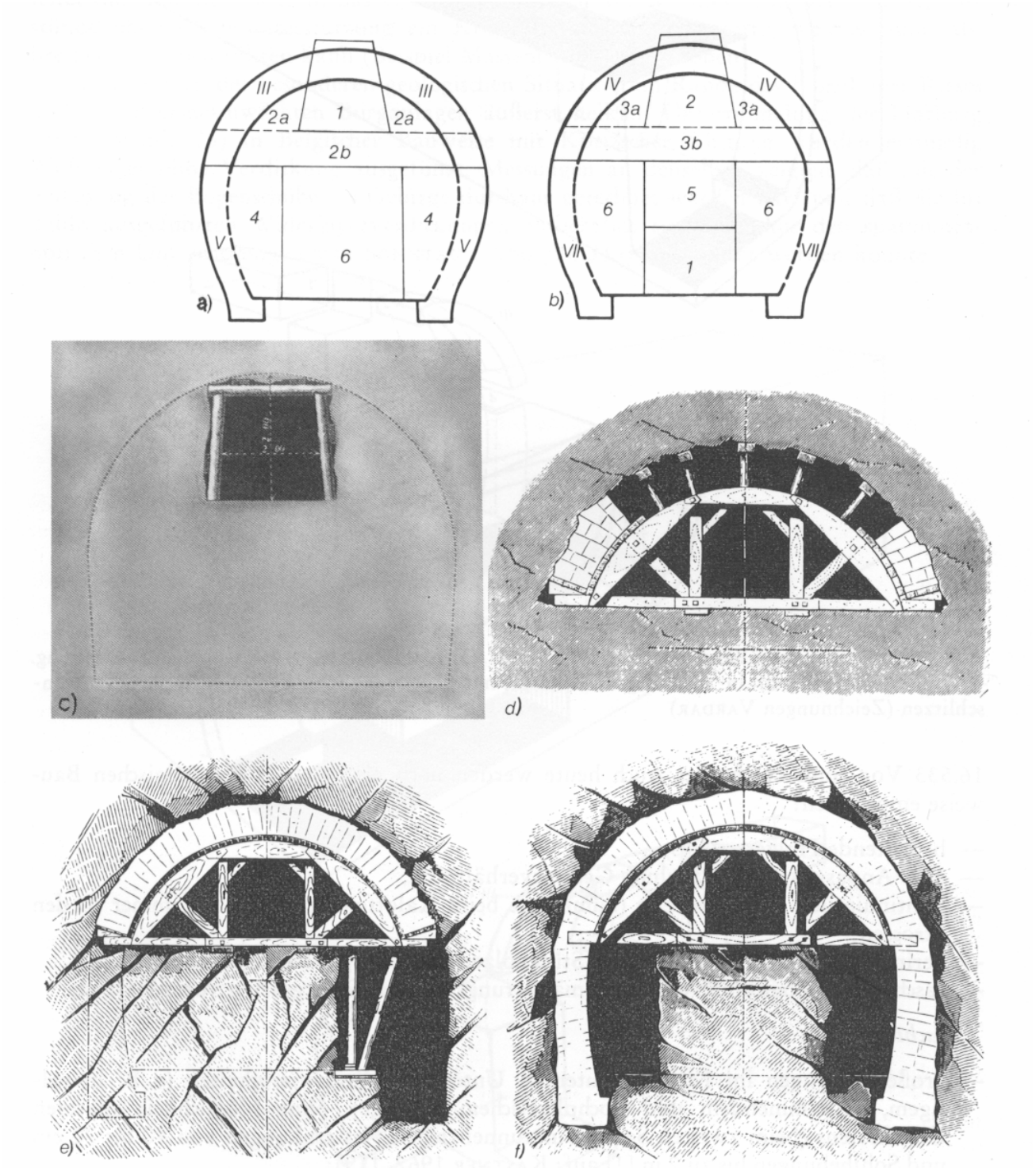
Πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η εξασφάλιση της πρόγνωσης των γεωλογικών συνθηκών από τη στοά προπορείας, η δυνατότητα κατασκευής πολλών μετώπων εξόρυξης, η μεταφορά στη βάση όλων των φορτίων των στηρίξεων μετά την κατασκευή της εγκοπής στη στέψη, ο διαχωρισμός των χώρων εκσκαφής και κατασκευής της υποστήριξης, και η δυνατότητα προσαρμογής της μεθόδου σε μεταβαλλόμενες γεωλογικά συνθήκες. Μειονεκτήματα της μεθόδου είναι οι μεγάλες απαιτήσεις σε ξύλα, ο μικρός χώρος εργασίας, οι μεγάλες υποχωρήσεις, ο μεγάλος χρόνος στήριξης σε ξύλα, και ο μεγάλος χρόνος μέχρι το κλείσιμο του ανάστροφου τόξου. Η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμη και σήμερα σε ελαφρά θρυμματιζόμενο μέχρι συνθλιβόμενο πέτρωμα. Λιγότερο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κορεσμένα πετρώματα, ενώ δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολύ εύθρυπτο και συνθλιβόμενο πέτρωμα.

1.2.2.4 Η Βελγική τεχνική (υποθεμελίωσης)

Το Βελγικό σύστημα ξεκινά με την κατασκευή μιας άνω στοάς, υποστηριζόμενης περίπου στο επίπεδο γένεσης του τόξου σε μια πεταλοειδή σήραγγα. Η στοά αυτή επεκτείνεται στη συνέχεια σε κάθε πλευρά ώστε να επιτρέπεται η κατασκευή του άνω τμήματος του τόξου. Στη συνέχεια κατασκευάζονται πλευρικές στοές στο κάτω τμήμα της σήραγγας, εντός των οποίων τοποθετείται η επένδυση της κάτω ημιδιατομής, η οποία υποθεμελιώνει την επένδυση της άνω ημιδιατομής. Το σύστημα ήταν εφικτό μόνο εκεί όπου τα φορτία του πετρώματος δεν ήταν βαριά.

Η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1828 στη σήραγγα της διώρυγας του Charleroy στο Βέλγιο (Maidl, 2004). Η σήραγγα είχε εμβαδόν διατομής 20m^2, μήκος 1288m και εξορύχθηκε μέσα σε ασταθείς άμμους. Χρησιμοποιήθηκε ευρέως στις κατασκευές των τουρκικών και περσικών σιδηροδρόμων του 1920-30. Με τη μέθοδο κατασκευάσθηκαν από το 1872 έως το 1882 οι σήραγγες του Mont-Cenis (2.8 km) και Saint Gotthard (15 km). Βασική ιδέα της μεθόδου είναι η γρήγορη εξόρυξη του άνω τμήματος της σήραγγας και η στήριξη του όχι μόνο προσωρινά αλλά και με τη μόνιμη στήριξη (λιθοδομή ή σκυρόδεμα). Κατόπιν γίνεται περιμετρική εκσκαφή στα κάτω πλευρά της σήραγγας και κατασκευή της κάτω στήριξης πάνω στην οποία υποστηρίζεται η άνω στήριξη (Σχήμα 1-13). Για το λόγο αυτό, ονομάστηκε μέθοδος της υποθεμελίωσης (Széchy , 1967).

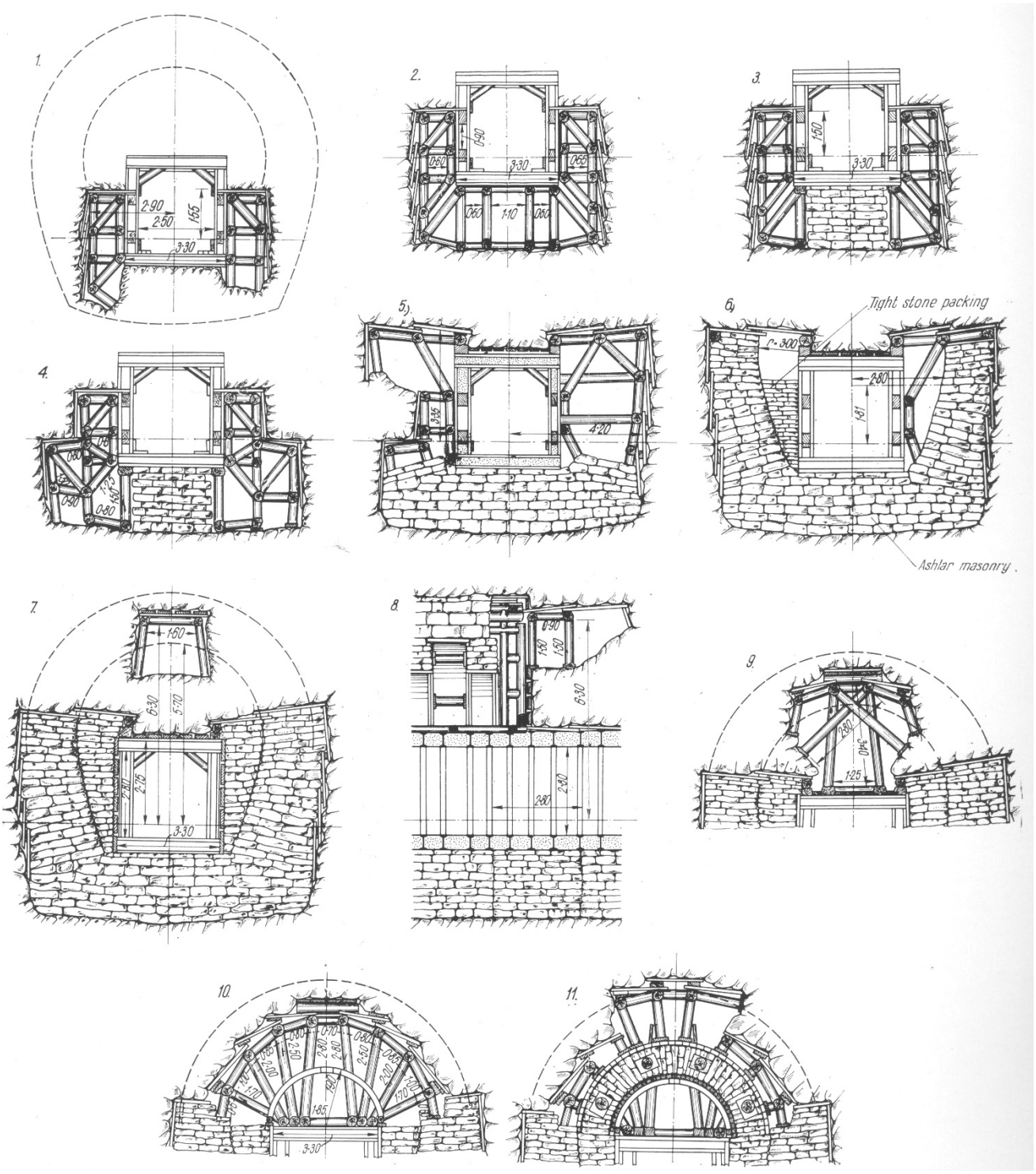
Πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η οικονομία σε ξυλεία σε σχέση με την παλαιά Αυστριακή, η καλή προσαρμογή σε μεταβαλλόμενα πετρώματα, η συνεχής προχώρηση, οι μικρές υποχωρήσεις, και το γρήγορο κλείσιμο του θόλου. Μειονεκτήματα της μεθόδου είναι: η ανάγκη φόρτωσης των μπαζών από κάτω προς τα άνω, η ανάγκη εργασίας από δάπεδο σε δάπεδο με χρήση δύσχρηστων και επικίνδυνων κεκλιμένων επιπέδων, η δυσχέρεια της εργασίας σε κάθε δάπεδο αν υπάρχουν πολλά νερά, και η δυσκολία τοποθέτησης της στεγάνωσης. Επίσης, δημιουργούνται μεγάλες υποχωρήσεις στη περίπτωση δυσκολίας υποστήριξης της άνω στήριξης, και σημαντικές συνθλίψεις σε περίπτωση καθυστέρησης της κατασκευής του ανάστροφου τόξου, και η. Η μέθοδος αντιμετωπίζει δυσκολίες κατά τη χρήση της σε πλαστικά και συνθλιβόμενα πετρώματα. Δεν χρησιμοποιείται σε κορεσμένα και εύθρυπτα πετρώματα καθώς και σε υψηλής πλαστιμότητας πετρώματα. Η χρήση της μεθόδου είναι σκόπιμη σε μεταβαλλόμενα ή σε μετρίως ευσταθή μέχρι ελαφρά συνθλιβόμενα πετρώματα.



Σχήμα 1-13. Βελγική μέθοδος – Φάσεις κατασκευής (Rziha, 1874).

1.2.2.5 Ιταλική τεχνική (αναστρόφου τόξου)

Είναι κατάλληλη για διάνοιξη σε ιδιαίτερα μαλακά πετρώματα. Αρχικά εκσκάπτεται το δάπεδο και κατασκευάζεται ισχυρή υποστήριξη στο ανάστροφο τόξο. Η εκσκαφή και επένδυση συνεχίζεται προς τα άνω με στήριξη επάνω στο ανάστροφο τόξο (Σχήμα 1-14).

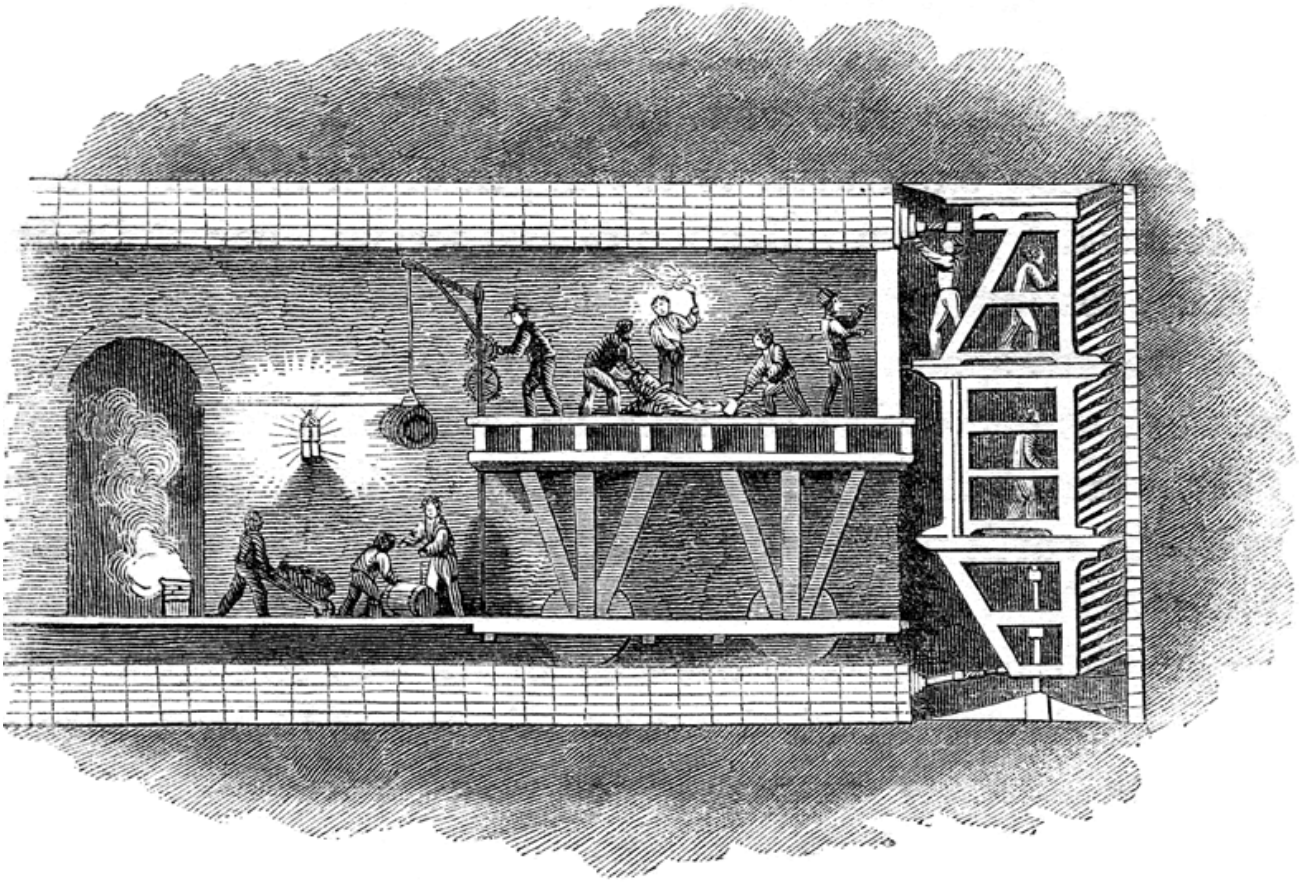


Σχήμα 1-14. Ιταλική τεχνική (Széchy , 1967)

1.2.3 Η διάνοιξη με ασπίδα

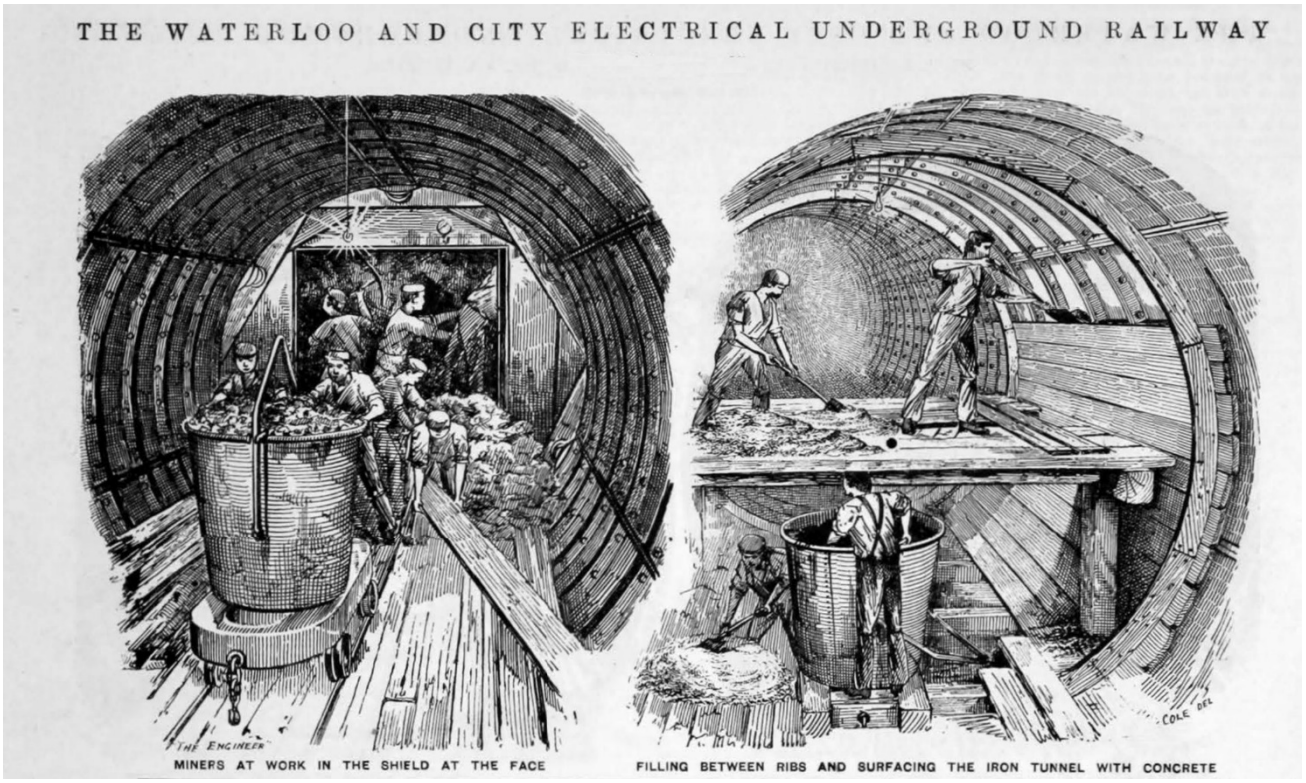
Η τμηματική διάνοιξη εν τούτοις δεν κατάφερνε πάντα τη σταθερότητα του εκσκαμμένου τμήματος εφόσον αυτό βρισκόταν σε μη συνεκτικό έδαφος και υπήρχε ισχυρή ροή νερού . Ιδιαίτερες τέτοιες περιπτώσεις αποτελούσαν οι διανοίξεις κάτω από πυθμένες ποταμών. Η εφεύρεση της ασπίδας το 1818, των δοκίδων προπορείας και των ηλώσεων του μετώπου από τον Sir Isambard Brunel διεύρυνε το πεδίο δυνατοτήτων διάνοιξης σε μαλακές γεωμάζες.

Η πρώτη υποπυθμένια σήραγγα, χωρίς παράκαμψη του ποταμού, άρχισε να διανοίγεται από τον M. Brunel το 1825 (Sandström, 1963). Σκοπός της ήταν κυρίως η ιππήλατη κυκλοφορία που θα εξυπηρετούσε τις υπό κατασκευή αποβάθρες στη νότια όχθη του ποταμού. Η διατομή εκσκαφής της σήραγγας ήταν ορθογωνική 11.44 m πλάτος και 6.71 m ύψος. Για τη διάνοιξη χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά ασπίδα (Σχήμα 1-15), δηλαδή ένα ικρίωμα αποτελούμενο από 12 κατακόρυφα χυτοσιδηρά πλαίσια που το καθένα περιείχε τρία κελιά, έκαστο 2 m (υ) × 0.8 m (π) × 2.7m (μ),, το ένα πάνω από το άλλο. Αυτή προσέφερε αντιστήριξη τόσο περιμετρικά όσο και στο μέτωπο με ξύλινες σανίδες ωθούμενες από ελικοφόρους γρύλους, ενώ συγχρόνως επέτρεπε την εκσκαφή του μετώπου με την αφαίρεση μιας ή περισσοτέρων σανίδων σε κάθε κελί. Το κτίσιμο της μόνιμης στήριξης που πραγματοποιούνταν πίσω της, αποτελούνταν από τούβλα συνδεμένα με τσιμεντοκονία και επενδυμένα εσωτερικά με πλακάκια.. Το εγχείρημα ήταν δύσκολο, λόγω των μη αναμενόμενων συνθηκών του εδάφους, τον κακό φωτισμό, και τις επανειλημμένες εισροές του ποταμού, που την πλημμύρισαν 5 φορές. Μετά την περάτωσή της το 1842, οι ανάγκες είχαν αλλάξει, και η σήραγγα δόθηκε αρχικά στους πεζούς το 1843 και το 1869 στο Σιδηρόδρομο Ανατολικού Λονδίνου που τώρα είναι μέρος του προαστιακού σιδηροδρόμου του Λονδίνου.



Σχήμα 1-15. Ασπίδα της σήραγγας κάτω από τον Τάμεση

Τη μορφή της ασπίδας, έτσι όπως την ξέρουμε σήμερα, την επινόησε ο Barlow. Αυτή εφαρμόστηκε το 1869, από τον βοηθό του, Greathead, σε απλούστερη μορφή που προωθούνταν από ελικοφόρους γρύλους, στη σήραγγα του μετρό στο Tower Hill στη δεύτερη σήραγγα κάτω από τον ποταμό Τάμεση. Η σήραγγα ήταν η πρώτη που επενδύθηκε από χυτοσιδηρά τόξα. Είχε μήκος 408 m, εσωτερική διάμετρο 2 m και πάχος φλάντζας επένδυσης 75 mm. Η επένδυση τοποθετήθηκε μέσα από το κέλυφος της ασπίδας εγχύθηκε με σύριγγα ένεμα για να γεμίσει το δακτύλιο πίσω από την επένδυση. Το σύστημά του χρησιμοποιήθηκε επίσης για τη διάνοιξη των διαμέτρου 3.7 m σηράγγων (Σχήμα 1-16) για τους σιδηροδρόμους Waterloo & City, το οποίο άνοιξαν το 1898. Την ίδια εποχή διανοίχτηκαν σήραγγες κάτω από ποτάμια ή λίμνες χωρίς τη βοήθεια ασπίδας, άλλοτε επιτυχώς, όπως στο Σικάγο ή στο Severn, και άλλοτε ανεπιτυχώς, όπως στο Cleveland.



Σχήμα 1-16. Η ασπίδα του Greathead σε χρήση στο υπόγειο σιδηρόδρομο Waterloo & City.

Η πρώτη χρήση των υδραυλικών γρύλων για την προώθηση ασπίδας πραγματοποιήθηκε το 1869 κάτω από το Broadway, στη Νέα Υόρκη. Στο New Cross στο Λονδίνο το 1871 ο Greathead χρησιμοποίησε ασπίδα κλειστού μετώπου με το έδαφος να κόβεται από πίδακες και τα μπάζα να απομακρύνονται ως πολφός· ήταν ο πρόδρομος της ασπίδας πολφού. Συστηματική εφαρμογή πιεσμένου αέρα χρησιμοποιήθηκε για τη διάνοιξη της σήραγγας κάτω από τον ποταμό Hudson το 1879.

Οι σήραγγες μετρό έχουν συνήθως πολύ μικρό ύψος υπερκειμένων, με αποτέλεσμα να μη δύναται το πέτρωμα να προσφέρει τη λειτουργία θόλου πάνω από αυτές. Επίσης, αντιμετωπίζουν συχνά την ύπαρξη νερών και την απαίτηση για ελαχιστοποίηση των καθιζήσεων. Τις αυξημένες απαιτήσεις σε αντιστήριξη δύναται να προσφέρει η ασπίδα. Κατά την πρώτη διάνοιξη σήραγγας μετρό, που άρχισε να κατασκευάζεται στο σιδηρόδρομο του Λονδίνου από τον Greathead το 1886 κατά τη διάνοιξη δίδυμων σηράγγων μήκους εκάστης 5.6 km και διαμέτρου 3.1 m, χρησιμοποιήθηκε η ασπίδα του Greathead με χρήση πιεσμένου αέρα, όπου απαιτούνταν. Είχε προηγηθεί το 1879 στην Αμβέρσα η επιτυχής διάνοιξη σήραγγας με πιεσμένο αέρα επενδυμένης με χυτοσίδηρο, ύψους 1.5 m και πλάτους 1.2 m. Έκτοτε αποτελεί μία από τις συνήθεις πρακτικές κατά τη διάνοιξη σηράγγων μετρό να χρησιμοποιείται εκμηχανισμένη ασπίδα, που αρχικά ήταν εξοπλισμένη με συστήματα αντιστάθμισης της πίεσης του νερού με πιεσμένο αέρα και αργότερα με πιο σύγχρονες μεθόδους, όπως με πίεση μπεντονίτη ή λάσπης εδάφους.

Τα χυτοσιδηρά ελάσματα έχουν υψηλή αντοχή σε θλίψη και χαμηλή σε εφελκυσμό, και βρήκαν ευρεία εφαρμογή για την επένδυση κυκλικών σηράγγων διανοιγόμενων από ασπίδα σε μαλακό έδαφος. Όμως, στη συνέχεια, λόγω του υψηλού κόστους τους αναζητήθηκαν άλλα υλικά. Επενδύσεις από δακτυλίους αποτελούμενους από τόξα οπλισμένου σκυροδέματος εισήχθησαν το 1936.

Ώθηση σωλήνων εφαρμόστηκε για πρώτη φορά στις ΗΠΑ το 1892. Από το 1970, στην Ιαπωνία, αναπτύχθηκε μια οικογένεια σμικρυμένων μηχανών για την κοπή του εδάφους, που σε μεγάλο βαθμό αντικατέστησε τα προηγούμενα συστήματα που εξαρτιόταν από την προώθηση ενός τυφλού σωλήνα.

1.3 Σύγχρονες Μέθοδοι διάνοιξης

Μέχρι το 1950 η σηραγγοποιία συνέχισε να θεωρείται σε μεγάλο βαθμό μια παραδοσιακή τέχνη που αναλαμβανότανε από εμπειρικά εκπαιδευμένους μεταλλωρύχους και ξυλουργούς. Οι μέθοδοι μελέτης που αναπτύχθηκαν κατά τον δέκατο ένατο αιώνα, είχαν επεκταθεί, χωρίς να έχουν ουσιαστικά τροποποιηθεί από τους Kommerell, Terzaghi και άλλους. Ο χρόνος όμως ήταν πια ώριμος για την εφαρμογή των ραγδαίων εξελίξεων στην κατανόηση της συμπεριφοράς των εδαφών και των πετρωμάτων. Από καιρό είχε γίνει αντιληπτό ότι το έδαφος, αν αφεθεί να παραμορφώνεται ελαφρώς, ήταν ικανό να συμβάλλει στην δική του στήριξη. Με τη γενική αντικατάσταση της ξύλινης υποστήριξης από την χαλύβδινη, είχε γίνει δυνατή η ποσοτικοποίηση του αποτελέσματος του παραμόρφωσης της σήραγγας και η μελέτη της κατασκευής και το χρονοδιάγραμμα στήριξής της, αντίστοιχα. Συγχρόνως, καθώς άρχισε ο κόσμος να ανακάμπτει από τις ελλείψεις υλικών και τους οικονομικούς περιορισμούς που ακολούθησαν το Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο, αυξήθηκε η ζήτηση σηράγγων, για οδικές / σιδηροδρομικές μεταφορές, τηλεπικοινωνίες, ύδρευση και αποχέτευση, αποθήκευση πετρελαίου, φυσικού αερίου, υδροηλεκτρικά έργα, και αμυντικά έργα ικανά να αντιμετωπίζουν τις διεισδυτικές ικανότητες των πυραύλων.

Οι Engesser το 1882 και Kommerell το 1912 παρείχαν μια απλουστευμένη λογική βάση για την εκτίμηση του φορτίου του διακλασμένου βράχου που θα έπρεπε να αναληφθεί από την υποστήριξη μιας τοξωτής σήραγγας. Μηχανικοί κατά το δέκατο ένατο αιώνα, όπως ο Rziha υποδείκνυαν την έγκαιρη τοποθέτηση της υποστήριξης στα διακλασμένα πετρώματα προκειμένου να αποφεύγεται η υψηλή φόρτισή τους από τη χαλάρωση του πετρώματος ως συνέπεια της εκσκαφής. Αργότερα, το 1912 ο Wiesmann, από την εμπειρία του στη διάνοιξη της σήραγγας Simplon, κατέδειξε με ποιοτικό τρόπο τις ευεργετικές συνέπειες της ελεγχόμενης παραμόρφωσης του συνθλίβοντος πετρώματος. Το επιστέγασμα ήταν επομένως ο συσχετισμός της μηχανικής συμπεριφοράς της υποστήριξης με αυτήν του πετρώματος πέριξ της προχωρούσας σήραγγας, προκειμένου να παρασχεθεί οικονομική και ευσταθής λύση. Αυτή η ιδέα είναι πλέον αποδεκτή ως θεμελιώδης για το σχεδιασμό των σηράγγων, με μεγάλη επακόλουθη οικονομία στην υποστήριξη της σήραγγας. Η κατανόηση της γεωλογικής δομής και η θεωρητική ανάλυση, βασισμένη σε αξιόπιστες περιοχές τιμών των παραμέτρων, εξασφάλιζαν τον ορθό σχεδιασμό της σήραγγας. Στο μεταξύ, παρατηρήσεις στις σήραγγες διανοιγμένες με χρήση καινοτόμων μορφών στήριξης, επικουρούμενες από την κατανόηση της γεωλογίας και τη χρήση απλουστευμένων αναλυτικών τεχνικών, επιτρέψανε τη διατύπωση κανόνων διάνοιξης για παρόμοιες συνθήκες. Οι συντάκτες των συστημάτων ταξινόμησης της βραχομάζας προσπάθησαν να παράσχουν να γενικεύσουν αυτές τις παρατηρήσεις.

Τεχνικές διερεύνησης του εδάφους επιτρέψανε την ανάκτηση αδιατάρακτων δειγμάτων εδάφους και βράχου. Η αναγνωρισμένη τεχνολογική ειδικότητα της εδαφομηχανικής επίτρεψε την εφαρμογή, στη μελέτη της εκσκαφής και υποστήριξης των σηράγγων, των μηχανικών ιδιοτήτων του εδάφους. Η διάδραση του περιβάλλοντος εδάφους με την υποστήριξη μπορούσε πια να υπολογιστεί. Προκειμένου ο δακτύλιος της υποστήριξης να μπορεί να αναλαμβάνει οικονομικά τα δρώντα φορτία, θα έπρεπε αυτά και οι ροπές εντός του δακτυλίου να ελαχιστοποιούνται. Τούτο θα επιτυγχανόταν με την ελεγχόμενη σύγκλιση της σήραγγας και την καμπτική ενδοτικότητα της επένδυσης που θα μπορούσε να επιτευχθεί, είτε μέσω κατάλληλα συνδεμένων τόξων είτε από επένδυση μικρού πάχους. Ο έλεγχος των επίγειων καθιζήσεων αντιμετωπίστηκε αρχικά από διαστελλόμενους δακτυλίους από προκατασκευασμένα τόξα, είτε μεταλλικά είτε από σκυρόδεμα. Για πολλές από τις πρώτες διαστελλόμενες επενδύσεις, τα τόξα ήταν σχεδιασμένα σε διαστάσεις μικρές που να επιτρέπουν το χειρισμό, την τοποθέτηση και την ένταση χωρίς την ανάγκη οπλισμού, για λόγους οικονομίας, επίτευξης πυκνού υψηλής ποιότητας σκυροδέματος και αποφυγής μακροπρόθεσμων προβλημάτων διάβρωσης. Στη συνέχεια η κατασκευή των σηράγγων υψηλών ταχυτήτων απαίτησε τη χρήση πλατύτερων δακτυλίων, 1-1.25 m, με ανάγκη για οπλισμό και την επακόλουθη προστασία, ιδιαίτερα πυκνό σκυρόδεμα, προσεκτικό έλεγχο του πάχους της επικάλυψης των οπλισμών, και χρήση καθοδικής προστασίας ή εποξικής επάλειψης του οπλισμού, ιδιαίτερα όπου η επένδυση ήταν εκτεθειμένη σε θαλασσινό ή μολυσμένο νερό.

Μετά το Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο η διάνοιξη βραχωδών σηράγγων εξελίχθηκε από παραδοσιακή τέχνη σε μία τέχνη βασισμένη στην τεχνολογία. Η περιγραφή του πετρώματος άρχισε να ποσοτικοποιείται, και η ανάπτυξη της ειδικότητας της βραχομηχανικής επίτρεψε αντίστοιχα την εφαρμογή των μηχανικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων στη μελέτη της διάνοιξης σηράγγων σε βράχο, με πρωτόλειες αναλύσεις, αυξημένες επιλογές των μέσων στήριξης και αντίληψη της επίδρασης της διαδικασίας των εργασιών στη συμπεριφορά του εδάφους. Η πολυπλοκότητα και η μεταβλητότητα των πετρωμάτων εμπόδισε μια πλήρως ορθολογική προσέγγιση.

Αντιθέτως, είχε γίνει προφανές ότι οποιαδήποτε λογική θα έπρεπε να εκφράζεται με απλούς όρους, άλλως η μεταβλητότητα θα απαιτούσε συνεχή επαναξιολόγηση.

1.3.1 Μέθοδοι του εκτοξευμένου σκυροδέματος (NATM)

Η διαδικασία της τοποθέτησης επί τόπου επένδυσης από σκυρόδεμα ήταν ασυμβίβαστη με την ξυλοδεσία υποστήριξης. Κατά συνέπεια, οι πρώτες χρήσεις επένδυσης σκυροδέματος ήταν για σήραγγες σε καλό βράχο. Με την εισαγωγή του χάλυβα υποστήριξης, η χρήση του σκυροδέματος ως υλικού επένδυσης έγινε ο κανόνας. Μία πρώτη χρήση του σκυροδέματος ως υλικού επένδυσης σήραγγας πραγματοποιήθηκε το 1892 για τη σήραγγα East Boston. Στα πρώτα χρόνια του εικοστού αιώνα, το σκυρόδεμα άρχισε να χρησιμοποιείται γενικότερα για την επένδυση των σηράγγων, με το σκυρόδεμα να εγχέεται πίσω από μεταλλότυπο υποστηριζόμενο από χαλύβδινα πλαίσια. Η επένδυση αυτή είχε το πλεονέκτημα να λαμβάνει το σχήμα των καμπυλών βράχου στο εξωράχειό της. Τα χαλύβδινα πλαίσια είχαν εν τω μεταξύ αντικαταστήσει σε μεγάλο βαθμό τη χρήση του ξύλου στις σήραγγες σε βράχο και, αργότερα, εισήχθησαν οι βραχοηλώσεις από την εξόρυξη των ορυχείων.

Πολλοί μηχανικοί εφάρμοζαν μιας ελαφρά υποστήριξη με ενδοτικότητα που να ταιριάζει στο έδαφος, σε αντίθεση με τις ογκώδεις, δύσκαμπτες, και αργές στην κατασκευή επενδύσεις τοιχοποιίας των πρώτων αλπικών σηράγγων, που καταλάμβαναν ως και το 40% της διατομής εκσκαφής. Στόχος ήτανε, να είναι στο μέγιστο βαθμό αυτοφερόμενη γεωμάζα γύρω από την περιφέρεια της σήραγγας. Η μεταλλεία ήταν πρωτοπόρα στην εφαρμογή ελαφρών υποστηρίξεων, καθώς ήταν, γενικά, αδιάφορη με ζητήματα απώλειας όγκου εδάφους. Ως εκ τούτου ήταν σε θέση να εκμεταλλεύεται τις φυσικές ιδιότητες του συνεκτικού εδάφους, κάνοντας χρήση βραχοηλώσεων, εκτοξευμένου σκυροδέματος και φρεζών για την εξόρυξη. Τα δύο πρώτα παρείχαν ελαφριά υποχωρούσα υποστήριξη, ενώ η τελευταία έδινε τη δυνατότητα προσαρμογής σε κάθε επιζητούμενη γεωμετρία. Το μεγάλο βήμα στη διάνοιξη σηράγγων συνέβη στη δεκαετία του 1950, με την αυξανόμενη κατανόηση της συμπεριφοράς των διακλασμένων πετρωμάτων, τη διαθεσιμότητα νέων τεχνικών βραχοήλωσης, την εφαρμογή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, και την ευκαιρία να δοκιμαστούν νέες ιδέες.

Τη δεκαετία του 1960, η βελτιωμένη αντίληψη της μηχανικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων αλλά και οι μεγαλύτερες δυνατότητες της τότε τεχνικής, έδωσε τη δυνατότητα στους μηχανικούς να τολμήσουν να σχεδιάσουν μέτρα υποστήριξης που θα αναλάμβαναν όσο το δυνατόν μικρότερο φορτίο αποτόνωσης του πετρώματος. Για το σκοπό αυτό απαιτούνταν όμως η συνεχής παρατήρηση της μηχανικής απόκρισης του πετρώματος, η δυνατότητα άμεσης αυξομείωσης της φέρουσας ικανότητας της υποστήριξης και η τοποθέτηση εύκαμπτης υποστήριξης. Με βάση την εμπειρία αυτή ο Rabcewicz έπλασε 1962 τον τίτλο «Νέα Αυστριακή Μέθοδος σηράγγων (NATM), της οποίας η επιστημονική βάση έχει αμφισβητηθεί ισχυρά (Kovari,). Η πρώτη εφαρμογή της ήταν στη μόλις 320m σιδηροδρομική σήραγγα του Schwaikheim (1963-65) στην Αυστρία, μέσα σε μάργες και δολομίτες. Σε αυτήν εφαρμόστηκε για πρώτη φορά σε μεγάλη διατομή σήραγγας, συστηματικά άμεση επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και ήλωση του πετρώματος. Είχαν προηγηθεί εφαρμογές τους σε υδραυλικές σήραγγες, όπως επένδυση από εκτοξευμένο σκυρόδεμα στη Lodano-Losogno (1951-55) για το υδροηλεκτρικό έργο Maggia στην Ελβετία και το 1952 στο Υδροηλεκτρικό Έργο στα Snowy Mountains της Νέας Νότιας Ουαλίας στην Αυστραλία, και συστηματική ήλωση του πετρώματος στην Isère Arc (1951-53).

Έκτοτε, η NATM, είτε με το όνομα με άλλα ονόματα όπως «μέθοδος του εκτοξευμένου σκυροδέματος» (Σχήμα 1-17), εφαρμόζεται μέχρι σήμερα σε πολύ μεγάλο ποσοστό των κατασκευαζόμενων σηράγγων. Στις νεότερες βαθιές αλπικές σήραγγες, η τοποθέτηση ελαφριάς υποστήριξης ικανής να ανέχεται τις μεγάλες συγκλίσεις για την εξισορρόπηση των πιέσεων των υπερκειμένων πετρωμάτων, επέτυχε μεγάλη οικονομία σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους. Στις σήραγγες Arlberg και Tauern αυτό επιτεύχθηκε με τη χρήση ολισθαινόντων χαλύβδινων τόξων Toussaint-Heinzmann. Οι μεγάλες οδικές σήραγγες στις Άλπεις αναπτύχθηκαν πολύ αργότερα από τις μεγάλες σιδηροδρομικές. Σημαντικότερες από τις οδικές είναι του Mont Blanc και του Gotthard (Kovari and Fechtig, 2000), που και οι δύο διανοίχτηκαν ολομέτωπα. Η σήραγγα του Mont Blanc έχει μήκος 12.7km και κατασκευάσθηκε μεταξύ 1959-65, και η σήραγγα του Gotthard έχει μήκος 16.9km και κατασκευάσθηκε μεταξύ 1969-77.



Σχήμα 1-17. Σήραγγα του Crossrail C510

1.3.2 Βελτίωση του εδάφους

Η βελτίωση του εδάφους με διάφορους τρόπους, όπως με ενέσεις ή ψύξη, έδωσε τη δυνατότητα τροποποίησης της μηχανικής συμπεριφοράς των εδαφικών σχηματισμών. Ο Bérigny εισήγαγε την ενεμάτωση με άργιλο και υδραυλική άσβεστο το 1802 και ο Hawksley τις τσιμεντενέσεις στη θεμελίωση φράγματος το 1867.

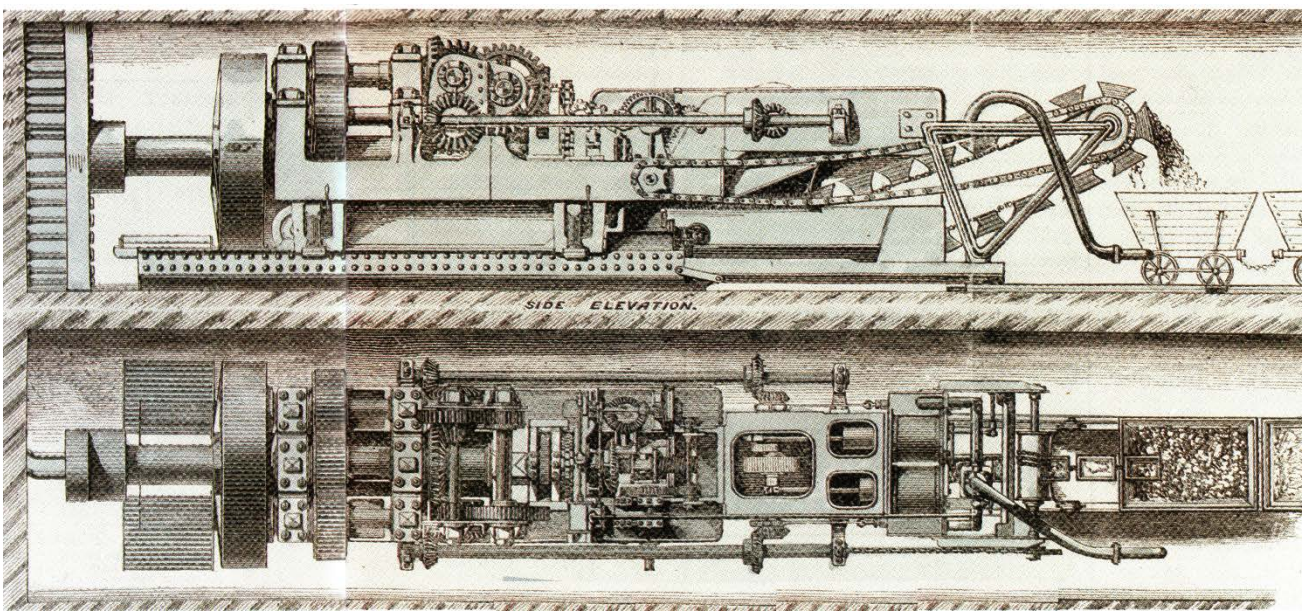
1.3.3 Διάτρηση ανατίναξη

Οι τεχνικές διάτρησης-ανατίναξης έχουν προχωρήσει μέσω της χρήσης πολλαπλών, σερβο-ελεγχόμενων υδραυλικών σφυρών, διαδικασία που όλο και πιο πολύ ελέγχεται από υπολογιστή, την ανάπτυξη εκρηκτικών και των καψυλλίων καθυστέρησης που να ταιριάζουν με τις απαιτήσεις κεντρικής και περιφερικής ανατίναξης του πετρώματος, και την υιοθέτηση των μη ηλεκτρικών καψυλλίων.

1.3.4 Μηχανές κοπής

Το ενδιαφέρον για τη διάνοιξη σήραγγας κάτω από την Μάγχη ενέπνευσε προτάσεις για μηχανική εκσκαφή. Οι πρώτες δοκιμές μιας μηχανής του Brunton, εξοπλισμένης με δίσκους κοπής, πέτυχαν το 1882 προχώρηση 12-17 m / ημέρα, αλλά ο σχεδιασμός της παρουσίασε άλυτα προβλήματα συντήρησης. Ο συνταγματάρχης Beaumont το 1875 εφηύρε μια περιστροφική μηχανή (Σχήμα 1-18) με δόντια (picks), η οποία βελτιώθηκε από τον συνταγματάρχη English και δοκιμάστηκε για τη Σήραγγα της Μάγχης το 1880. Μέχρι την άνοιξη του 1882 αυτή η μηχανή διαμέτρου 2.1 m είχε διανοίξει μια σήραγγα μήκους 800 m στο Abbotscliff και μια σήραγγα 1100 m κάτω από τη θάλασσα από έναν φρέαρ στο ανθρακωρυχείο Shakespeare. Μια βελτιωμένη και πιο ισχυρή μηχανή, που κατασκευάστηκε το 1882 από τη Batignolles, εξόρυξε περίπου 1700 m της γαλλικής

σήραγγας στο Sangatte, επιτυγχάνοντας μέγιστο ρυθμό προχώρησης 24.8 m / ημέρα. Η περαιτέρω ανάπτυξη των μηχανών διάνοιξης σηράγγων περίμενε τη δεκαετία του 1950.



Σχήμα 1-18. Σύγχρονο σχέδιο της μηχανής διάτρησης σήραγγας της δεκαετίας του 1880 βασισμένης στην ιδέα των συνταγματάρχη Frederick Beaumont και Thomas English. Η μηχανή ήταν 9 μέτρα μήκος και λειτουργούσε με πιεσμένο αέρα.

Φρέζες και εκσκαφείς διαφόρων τύπων, ισχύων και τα μεγεθών αναπτύχθηκαν από την ευρεία χρήση τους στον τομέα της μεταλλείας. Η μεταφορά των μπαζών εντός της σήραγγας μπορεί να καθορίσει την ταχύτητα προχώρησης της σήραγγας. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται μακροί εκτατοί ιμάντες μεταφοράς, όπου ο χώρος και η γεωμετρία το επιτρέπει, ή πιο συχνά συρμοί από βαγόνια.

Στη σημερινή εποχή η διάνοιξη των σηράγγων βασίζεται στη μεγάλη ικανότητα των μηχανών διάτρησης και κοπής του πετρώματος και των μεθόδων στήριξης και βελτίωσής του. Τα σύγχρονα υδραυλικά διατρητικά μηχανήματα δεύτερης γενιάς έχουν τη δυνατότητα να διατρούν έως και 300m ανά ώρα και χειριστή. Οι μηχανές ολομέτωπης κοπής αναπτύχθηκαν αρχικά από τον J.S. Robbins το 1952 και 1956. Σήμερα έχουν τη δυνατότητα διάνοιξης και στα πιο δύσκολα εδάφη και επιτυγχάνουν μέσες εβδομαδιαίες αποδόσεις που ξεπερνούν τα 260m την εβδομάδα. Οι μέθοδοι στήριξης συμπεριλαμβάνουν κλασσικά μέτρα, όπως χαλύβδινα πλαίσια, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και ηλώσεις, που συμπληρώνονται από ειδικότερα μέτρα όπως δοκοί ή αψίδες προπορείας, και μέτρα βελτίωσης του εδάφους, όπως αποστραγγίσεις, ενέσεις σταθεροποίησης ή στεγάνωσης, και ψύξη του εδάφους. Στις περιπτώσεις εκμηχανισμένης διάνοιξης χρησιμοποιούνται συνήθως προκατασκευασμένα στοιχεία στήριξης του πετρώματος από σκυρόδεμα ή από μέταλλο, που δύνανται και να προωθούνται από σημεία σε απόσταση από το μέτωπο.

1.3.5 Συνοπτικά

Ο Πίνακας 1-1 δίνει μια σύνοψη της εξέλιξης στο σχεδιασμό της κατασκευής των σηράγγων, από το 19ο αιώνα μέχρι και σήμερα.

Πίνακας 1-1. Σύνοψη μεταβαλλόμενων απαιτήσεων κατασκευής σηράγγων σε ασθενείς γεωμάζες (Τροποποίηση από Grose et al., 2005)

Περίοδος	Μελετητικά και κατασκευαστικά θέματα	Επιλεγμένα παραδείγματα
19ος αιών	Διαστασιολόγηση της επένδυσης με εμπειρικούς κανόνες Έλεγχος του νερού και της ευστάθειας του μετώπου Μέθοδοι κοπής και επανεπίχωσης με αρχική ξύλινη υποστήριξη και μόνιμη υποστήριξη από λιθοδομή Ασπίδα Brunel (1825) και υποστήριξη από χυτοσίδηρο πίσω από την ασπίδα του Greathead (1869) Επίγειες καθιζήσεις γενικά δεν λαμβάνονταν υπόψη Χρηματοδότηση είτε ιδιωτική είτε υβριδική με βάση ειδικά διατάγματα	Σήραγγα Brunel στον Τάμεση (1825-28)- 1η ασπίδα σήραγγας Greathead Tower subway (1869/70) Ανοικτή εκσκαφή γραμμών Μετρό του Λονδίνου
1900-ΙΙ Π.Π.	Εμπειρικός σχεδιασμός σε συνδυασμό με πρώτες χρήσεις της εδαφομηχανικής Χρήση ανοικτών ασπίδων σε ασταθή εδάφη Χρήση πιεσμένου αέρα σε ασταθείς και υδροφόρες γεωμάζες Αυξημένη χρήση δακτυλίων από κυκλικά στοιχεία χυτοσιδήρου σε συνδυασμό με ασπίδα Αρχίζουν να λαμβάνονται υπόψη δυνητικές επίγειες καθιζήσεις	Διεύρυνση σταθμών μετρό του Λονδίνου (1905-6) με χρήση πιεσμένου αέρα. Σήραγγα κάτω από Elbe (1909-11), με χρήση ασπίδας, πιεσμένου αέρα, προκατασκευασμένων στοιχείων σκυροδέματος και παρεμβυσμάτων μολύβδου
Μετά τον ΙΙ Π.Π. - 1970	Θεωρία σύγκλισης - αποτόνωσης – Εφαρμογή της NATM σε βραχώδη πετρώματα Συντελεστής ευστάθειας (Brohms et al) Σταδιακή απόσυρση της λιθοδομής, με εξαίρεση τους αποχετευτικούς αγωγούς Κλειστές ολομέτωπες ασπίδες μπεντονίτη Ευρεία χρήση πιεσμένου αέρα σε συνδυασμό με ασπίδα για τη στήριξη του μετώπου σε μαλακές αργίλους και υδροφόρες άμμους Η ανεπάρκεια χάλυβα επέβαλε τη χρήση προκατασκευασμένων στοιχείων σκυροδέματος (PCC) για την υποστήριξη Σχεδιασμός με τη μέθοδο της παρατήρησης (Peck, 1969) Αναγνώριση της σημασίας των επίγειων καθιζήσεων και διατύπωσή τους από τους Peck et al	Κατασκευή των πρώτων ασπίδων μπεντονίτη στην Ιαπωνία (1961) και Αγγλία (1965)
1970-1990	Ανάλυση της επένδυσης με μεθόδους ελαστικού συνεχούς μέσου Αρχικές εφαρμογές της μεθόδου FE (πεπερασμένων στοιχείων) βασισμένες σε ελαστικά πρότυπα εδάφους Πρόταση σχεδιασμού (Wood, 2000) που στηρίζεται στη μέθοδο της παρατήρησης Προσομοίωση μηχανισμών κατάρρευσης με φυγοκεντριστή Αναλύσεις με βάση ελαστο-πλαστικά πρότυπα εδάφους Εμπειρικές μέθοδοι εκτίμησης των επίγειων καθιζήσεων (O'Reilly & New, Attewell, etc) Ανάλυση της επίδρασης της διάνοιξης σε λιθόκτιστα κτίρια, βασισμένη στο ανάλογο ελαστικής δοκού (Burland, Boscardin & Cording Εκτεταμένη εφαρμογή ασπίδων και PCC (προκατασκευασμένων στοιχείων σκυροδέματος). Σταδιακή μείωση της εφαρμογής SGI Εφαρμογή SCL (NATM) σε μαλακά εδάφη στη Γερμανία Μη αποδεκτή πλέον η μακροχρόνια έκθεση σε πιεσμένο αέρα (νέκρωση των οστών) Ευρεία χρήση μέτρησης υπόγειων μετατοπίσεων με εκτασιόμετρα και αποκλισιόμετρα Ανάπτυξη των μηχανών EPB και Μπεντονίτη. Παρεμβύσματα EPDM (Ethylene Propylene Diene Monomer) για επενδύσεις PCC μονού περάσματος Ανυψωτές κενού για τοποθέτηση στοιχείων	Γραμμή Victoria (London, 1969-70) με μικτή χρήση PCC και SGI NATM σε πλαστικές αργίλους στο Μετρό Frankfurt (1970) Πειραματική εφαρμογή διάνοιξης σήραγγας με ασπίδα μπεντονίτη στο New Cross UK (1972-3) Κατασκευή ασπίδων EPBM στην Ιαπωνία (1976) Πρώτη χρήση ασπίδας EPBM στις ΗΠΑ σε υδραυλικό έργο στο San Francisco (1981)
1990-σήμερα	Ανάλυση 2D FE που εμπεριέχει επακριβή ελαστο-πλαστικά μοντέλα εδάφους και διάδραση με την υποστήριξη	Μετρό της Lyon και του Cairo με TBM μπεντονίτη (στα 1990)

	Λεπτομερέστερη ανάλυση κινδύνου ζημιών βασισμένη στη θεώρηση ελαστικού κτιρίου-δοκού Παρακολούθηση μετακινήσεων σε γεώτρηση και επεξήγηση των υπεισερχόμενων μηχανισμών Αυτοματισμός της παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο της απόκρισης των δομημάτων στις καθιζήσεις Ενσωμάτωση της ανθεκτικότητας στην πυρκαγιά και της μελέτης ελέγχου/αερισμού, στο σχεδιασμό της επένδυσης. Μικτές και υβριδικές ασπίδες μέχρι 16m διάμετρο. Ασπίδες EPBM ή μπεντονίτη, με ενεμάτωση από την ουρά Τεχνικές ενεμάτωσης για αντιστάθμιση καθιζήσεων Ηλεκτρονικός τοπογραφικός έλεγχος της διατομής εκσκαφής με laser Χρήση ινών για οπλισμό προκατασκευασμένων στοιχείων ή εκτοξευόμενου σκυροδέματος Περιβαλλοντική νομοθεσία δημιουργεί την ανάγκη για σήραγγες αποχέτευσης αποβλήτων Κανονισμοί υγιεινής και ασφάλειας περιορίζουν την έκθεση σε HAVS (Δονητικό σύνδρομο των χεριών) και στη χρήση χειρονακτικών μεθόδων όρυξης Κανονισμοί επιβάλουν τη διαχείριση του κινδύνου, με ευθύνη του μελετητή, στο σχεδιασμό Στις συμβάσεις συμπεριλαμβάνεται ο επιμερισμός της ευθύνης Διατυπώνονται οι πρώτοι κανονισμοί μελέτης και κατασκευής σηράγγων	Δοκιμαστική σήραγγα Heathrow express (1992) με NATM/SCL. Μετρό Μαδρίτης (1995-99), EPBM Μετρό της Αθήνας, διπλής τροχιάς σήραγγα (1987-), με χρήση μηχανών σημειακής και ανοικτού τύπου ολομέτωπης εκσκαφής, καθώς και κλειστού τύπου EPB Μετρό Θεσσαλονίκης, μονής τροχιάς σήραγγα
Μέλλον	3D αναλύσεις για σχεδόν όλα τα προβλήματα Στοχαστικές μέθοδοι για παραμετρικές αναλύσεις και ποσοτικοποίηση του κινδύνου Πλήρης διασύνδεση TBM και συστημάτων παρακολούθησης για άμεση απόκριση DPLEX (Μηχανές μη κυκλικού σχήματος) και TBM πολλαπλών κεφαλών σε υψηλότερες πιέσεις μετώπου (>10bar) TBM, αυτόματα, μακρινού χειρισμού, με αυξημένες απαιτήσεις εκπαίδευσης προσωπικού Νέες μέθοδοι ανάθεσης κατασκευής και επιμερισμού ευθυνών	

1.4 Διάκριση των σηράγγων

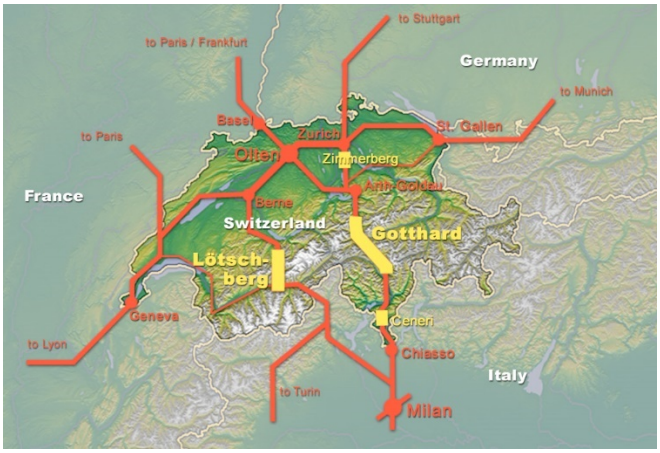
Στις σύγχρονες σήραγγες έχουν προστεθεί μέθοδοι κατασκευής που δε θυμίζουν σε τίποτα τις κλασσικές σήραγγες. Έτσι, δυνάμεθα να διακρίνουμε πλέον το σύνολο των σήμερα κατασκευαζόμενων σηράγγων σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τις υπόγειες και τις υποβρύχιες. Τις υπόγειες σήραγγες δυνάμεθα να διακρίνουμε σύμφωνα με τον τρόπο εκσκαφής τους σε διάτρησης (bored) ή υπόγειας εκσκαφής και σε κοπής και επίχωσης (cut and cover) ή ανοικτής εκσκαφής. Οι υποβρύχιες σήραγγες διακρίνονται σύμφωνα με τον τρόπο έδρασής τους σε επιπυθμένιες ή ποντισμένες (immersed) και σε υποπλέουσες (floating) ή σηραγγογέφυρες. Ο Πίνακας 1-2 απεικονίζει αυτή τη διάκριση των σηράγγων.

Πίνακας 1-2. Διάκριση σηράγγων με βάση τη στάθμη τους και τον τρόπο κατασκευή τους

	Από την επιφάνεια του εδάφους			
Κάτω από τη Θάλασσα;	Πάνω	Επί	Κάτω	Πολύ κάτω
Όχι	-	Ανοικτής εκσκαφής (cut & cover)	Συνήθεις (Διάτρησης)	Βάσης (Διάτρησης)
Ναι	Υποπλέουσες (σηραγγο-γέφυρες)	Επιπυθμένιες (ποντισμένες)	Υποπυθμένιες (Διάτρησης)	-

1.4.1 Σήραγγες διάτρησης

Από τις παραπάνω σήραγγες, οι διάτρησης μόνον ανήκουν στην κλασσική σηραγγοποιία, δηλαδή στην υπόγεια διάνοιξη. Τέτοιες σήραγγες, οδικές και σιδηροδρομικές, κατασκευάζονται πάρα πολλές στον κόσμο όπως και στην Ελλάδα. Σήμερα με τις δυνατότητες που υπάρχουν είναι εφικτή η κατασκευή σηράγγων πολύ μεγαλύτερου μήκους και σε μεγαλύτερα βάθη. Τούτο έδωσε τη δυνατότητα κατασκευής συστημάτων σιδηροδρομικής μεταφοράς που περιλαμβάνουν σήραγγες στις βάσεις των οροσειρών, αντί για τις υψηλότερες στάθμες κορυφής που τοποθετούνταν αρχικά. Έτσι άρχισε η διαδικασία κατασκευής δίδυμων σιδηροδρομικών σηράγγων στις βάσεις των Άλπεων (Σχήμα 1-19) κάτω και από ομώνυμες παλαιότερες σιδηροδρομικές σήραγγες. Η μεγαλύτερη είναι η σήραγγα βάσης του Gotthard, μήκους 2x56.9km σε μέγιστο υψόμετρο 550m (NRLA, 2006· Anagnostou & Ehrbar, 2013) στο επίπεδο της πόλης Bern, αντί για τα 1150m του προηγούμενου σιδηροδρομικού συστήματος. Η διάνοιξή της άρχισε το 1993 και ολοκληρώθηκε το 2016. Αντίστοιχα, η διάνοιξη της σήραγγας βάσης του Lötschberg μήκους 2x41.9km άρχισε 1994 και ολοκληρώθηκε το 2007. Τα σύγχρονα αυτά συστήματα μεταφοράς έχουν μικρές καμπυλότητες και κλίσεις, με αποτέλεσμα να επιτρέπουν τη μεταφορά διπλάσιων φορτίων και ταχύτερων διαδρομών.



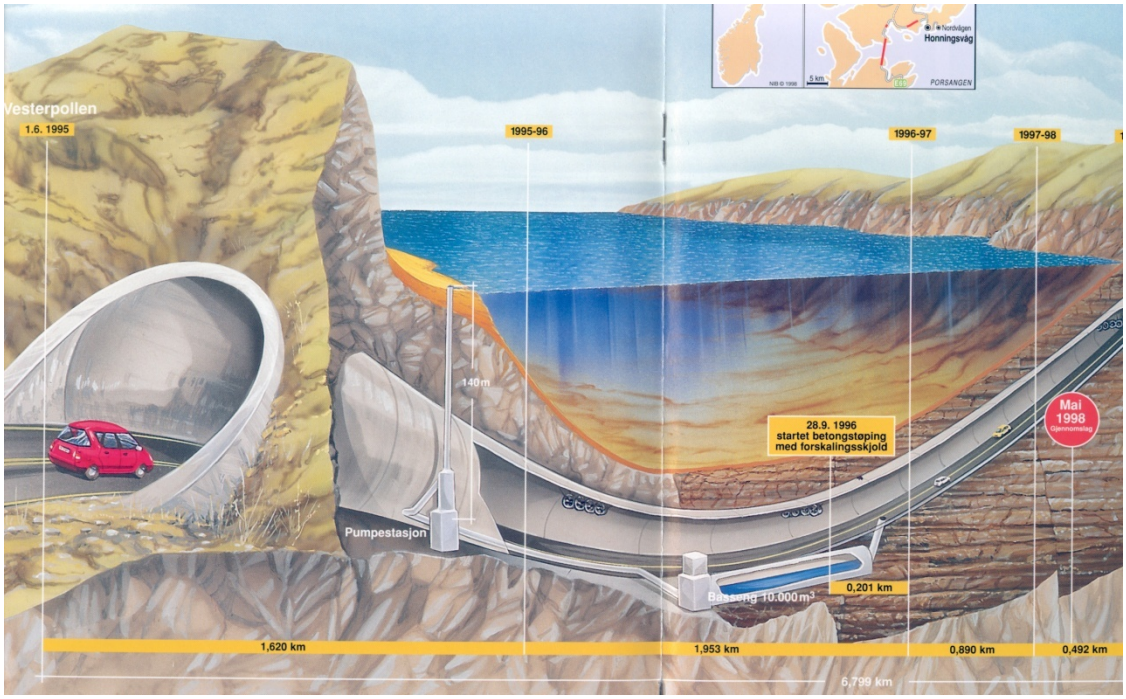
(α) Δίκτυο σιδηροδρόμων στις άλπεις (Wikimedia)



(β) Σήραγγα βάσης Gotthard

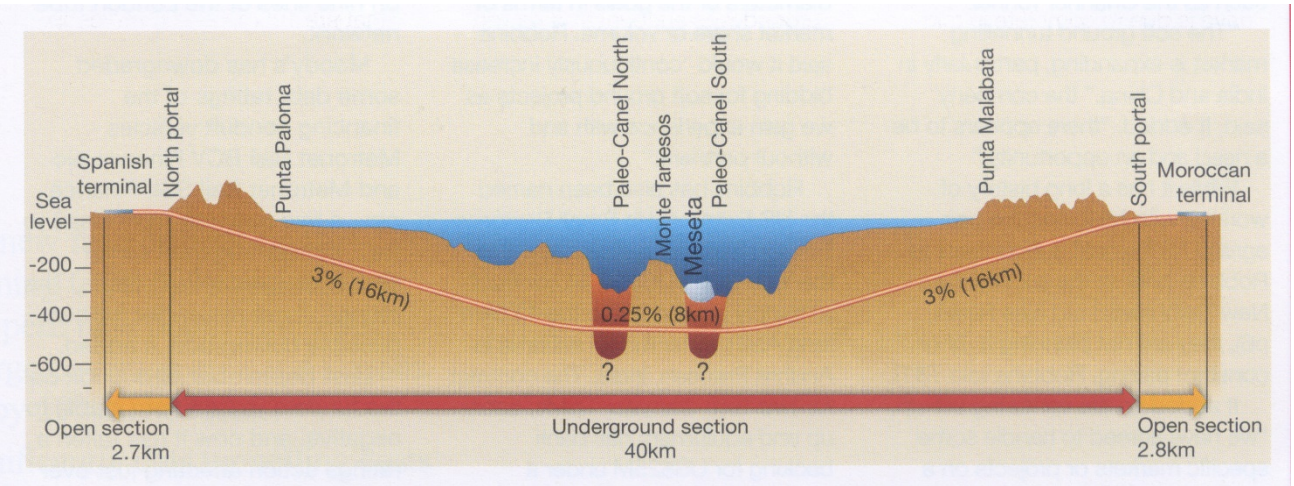
Σχήμα 1-19. Σήραγγες βάσεις στις άλπεις

Κατασκευάζονται σήραγγες επίσης, και κάτω από τον πυθμένα ποταμών, λιμνών ή και θαλασσών, οπότε ονομάζονται υποπυθμένιες. Στη Νορβηγία έχει κατασκευασθεί μεγάλος αριθμός υποπυθμένιων (Σχήμα 1-20) οδικών σηράγγων που ενώνουν τις ακτές των φιόρδ ή τις νήσους με την ηπειρωτική Νορβηγία.



Σχήμα 1-20. Υποπυθμένια σήραγγα στη Νορβηγία (πηγή)

Ιδιαίτερη περίπτωση αποτελεί η διάβαση στενών θαλασσών (straight crossing) με σήραγγες. Οι δύο σημαντικότερες τέτοιες σήραγγες είναι του Seikan στην Ιαπωνία που ολοκληρώθηκε το 1988 και έχει μήκος 54km, και του στενού της Μάγχης (Chunnel) που κατασκευάσθηκε μεταξύ 1986 και 1993 και έχει μήκος 50km. Στις σχεδιαζόμενες πολύ μεγάλες διηπειρωτικές διαβάσεις συγκαταλέγονται η μήκους 37.7km σήραγγα του Gibraltar (Σχήμα 1-21), ενώ στο απώτερο μέλλον εντάσσεται η κατασκευή της, μήκους 64 km, σήραγγας διάβασης του Βερίγγειου πορθμού.



Σχήμα 1-21. Υποπυθμένια σήραγγα του Gibraltar (πηγή)

1.4.2 Σήραγγες κοπής και επίχωσης

Οι σήραγγες κοπής και επίχωσης (Σχήμα 1-22) κατασκευάζονται επίσης συχνότατα. Είναι σήραγγες που κατασκευάζονται μέσα σε ανοικτό όρυγμα. Ιδιαίτερη αξία αποκτούν παραλλαγές της μεθόδου που δίνουν τη δυνατότητα υπόγειας διάνοιξης αφού πρώτα έχει κατασκευασθεί η οροφή της σήραγγας.



Σχήμα 1-22. Σήραγγα ανοικτής εκσκαφής (© Copyright Paul Dixon)

1.4.3 Επιπυθμένιες σήραγγες

Η πρώτη επιπυθμένια σήραγγα κατασκευάσθηκε στο λιμάνι της Βοστόνης το 1896, και η πρώτη σιδηροδρομική σήραγγα κάτω από τον ποταμό του Detroit το 1910. Έκτοτε κατασκευάσθηκαν πάνω από 100 τέτοιες σήραγγες με σημαντικότερη αυτή στο στενό του Oresund, μήκους 3.52 km, μεταξύ Copenhagen (Δανία) και Malmö (Σουηδία), η οποία ολοκληρώθηκε το 1999. Πληθώρα τέτοιων σηράγγων έχει κατασκευαστεί στην Ολλανδία (Beek et al., 2003). Η πρώτη επιπυθμένια σήραγγα στην Ελλάδα (1995-2000), μήκους 909m, κατασκευάσθηκε για τη ζεύξη του πορθμού Πρεβέζης-Ακτίου. Για την κατασκευή της σήραγγας κατασκευάζεται πρώτα υφαλαύλακας (Σχήμα 1-23α) εντός του οποίου ποντίζονται και συνδέονται οι σπόνδυλοί της, αφού προκατασκευαστούν (Σχήμα 1-23β) στη νηοδόχο.



(α) Επιπυθμένια οδική και σιδηροδρομική σήραγγα Fehmarnbelt



(β) Σπόνδυλοι επιπυθμένιας σήραγγας, στη νηοδόχο.

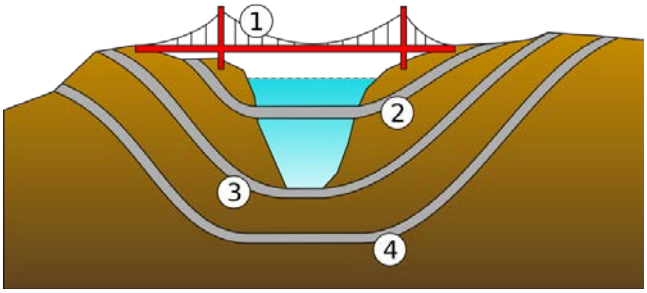
Σχήμα 1-23. Επιπυθμένιες σήραγγες

1.4.4 Υποβρύχιες γέφυρες

Η κατασκευή σηραγγογεφυρών ή υποπλεουσών σηράγγων (Σχήμα 1-24α) βρίσκεται εδώ και 30 χρόνια μόνο στα σχέδια. Έχει προταθεί για διάφορες διαβάσεις στενών όπως της Μεσσήνης, φιόρδ όπως του Hogsfjord, λιμνών όπως του Lugano, και κόλπων όπως του Funka στην Ιαπωνία. Κατά τη μελέτη ζεύξης στενών δύνανται να εξετάζονται εναλλακτικά λύσεις όπως αυτές που φαίνονται στο Σχήμα 1-24β.



(α) Υποπλέουσα σήραγγα



(β) Εναλλακτικές ζεύξεις (1) γέφυρα, (2) σηραγγογέφυρα, (3) επιπυθμένια, (4) υποπυθμένια

Σχήμα 1-24. Ζεύξη στενών

1.5 Σημαντικά έργα

1.5.1 Συγκοινωνιακές σήραγγες στον κόσμο

Οι μακρύτερες σήραγγες στον κόσμο κατασκευάζονται είτε κάτω από τις βάσεις οροσειρών είτε για τη ζεύξη στενών. Τα μεγαλύτερα μήκη έχουν οι σιδηροδρομικές. Ο Πίνακας 1-3 δίνει τις 5 μεγαλύτερες κατασκευασμένες σιδηροδρομικές σήραγγες. Ο
Πίνακας 1-4 δίνει τις 5 μεγαλύτερες οδικές σήραγγες. Οι πλειονότητά τους βρίσκεται στις Άλπεις (Kovári & Descoeudres, 2001).

Πίνακας 1-3. Οι 5 μακρύτερες σιδηροδρομικές σήραγγες στη γη

A/A	Χώρα ή Χώρες	Όνομα	Έναρξη λειτουργίας	Μήκος [km]
1	Ελβετία	Gotthard	2016	57.00
2	Ιαπωνία	Seikan	1988	53.85
3	Γαλλία-Αγγλία	Chunnel	1994	50.50
4	Ελβετία	Lötschberg	2007	34.00
5	New Guanjiao	Qinghai, China	2014	32.65

Πίνακας 1-4. Οι 5 μακρύτερες οδικές σήραγγες

A/A	Χώρα ή Χώρες	Όνομα	Έναρξη κατασκευής-λειτουργίας	Μήκος [m]/ βάθος [m]
1	Νορβηγία	Laerdal	1995-2000	24500/1450
2	Ελβετία	Gotthard	1980	16918
3	Αυστρία	Arlberg	1978	13972
4	Γαλλία-Ιταλία	Frejus	1980	12865
5	Γαλλία-Ιταλία	Mont Blanc	1965	11600

1.5.2 Συγκοινωνιακές σήραγγες στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα, προηγήθηκαν των συγκοινωνιακών σηράγγων οι υδραυλικές σήραγγες μικρότερης διαμέτρου, που κατασκευάστηκαν από την ΔΕΗ και την ΕΥΔΑΠ. (βλ. http://tunnelling.metal.ntua.gr/gts/activities.htm).

1.5.2.1 Σιδηροδρομικές σήραγγες

Η ΕΡΓΟΣΕ αναβαθμίζοντας το Ελληνικό σιδηροδρομικό δίκτυο σε γραμμές υψηλών ταχυτήτων, έχει κατασκευάσει πληθώρα σηράγγων, κυρίως στις γραμμές Αθήνα Θεσσαλονίκη και Αθήνα-Κόρινθος-Πάτρα. Από αυτές οι μακρύτερες είναι του Καλλίδρομου της Όθρυος, των Τεμπών και της Παναγοπούλας. Η σήραγγα Καλλίδρομου είναι δίδυμη σήραγγα μήκους 9.2 km στο τμήμα Τιθορέα – Λειανοκλάδι. Είναι η μακρύτερη σιδηροδρομική σήραγγα της Ελλάδας και όλων των Βαλκανίων. Η κατασκευή της άρχισε το 1998, ολοκληρώθηκε το 2015 και αναμένεται να δοθεί στην κυκλοφορία το 2017. Η Σήραγγα Όθρυος είναι δίδυμη σήραγγα μήκους 6.4 km στο τμήμα Λιανοκλάδι – Δομοκός. Η σήραγγα έχει ολοκληρωθεί και προβλέπεται επίσης να λειτουργήσει το 2017. Η Σήραγγα Τεμπών είναι μονή σήραγγα διπλής κατεύθυνσης 5.0 km στο τμήμα Λάρισα-Θεσσαλονίκη, και έχει δοθεί στην κυκλοφορία. Η σήραγγα Παναγοπούλας είναι δίδυμη σήραγγα μήκους κάθε κλάδου 4.4 km στο τμήμα Αίγιο - Πάτρα. Η διάνοιξή της ολοκληρώθηκε το 2016 και αναμένεται να λειτουργήσει το 2019. Μικρότερες είναι: η μονή σήραγγα Αιγίου διπλής κατεύθυνσης μήκους 3.5 km στο τμήμα Κιάτο - Αίγιο που έχει ολοκληρωθεί και προβλέπεται να λειτουργήσει εντός του 2016, η σε κυκλοφορία σήραγγα μονής γραμμής Περάματος στο τμήμα Ικόνιο-Θριάσιο μήκους 3.5 km, η μονή σήραγγα Πλατάνου διπλής κατεύθυνσης μήκους 2.7 km στο τμήμα Κιάτο – Αίγιο που έχει ολοκληρωθεί και προβλέπεται να λειτουργήσει εντός του 2016, η μονή σήραγγα Τράπεζας διπλής κατεύθυνσης μήκους 2.7 km στο τμήμα Κιάτο – Αίγιο που έχει ολοκληρωθεί και προβλέπεται να λειτουργήσει εντός του 2016, η μονή σήραγγα Πλαταμώνα μήκους 2.6 km διπλής κατεύθυνσης στο τμήμα Λάρισα-Θεσσαλονίκη που έχει δοθεί στην

κυκλοφορία, και η μονή σήραγγα διπλής κατεύθυνσης Κακιάς Σκάλας μήκους 2.4 km στο τμήμα Αθήνα – Κόρινθος που έχει δοθεί στην κυκλοφορία.

1.5.3 Οδικές σήραγγες

Στο Σχήμα 1-25 φαίνονται οι νέοι ελληνικοί οδικοί άξονες ευρωπαϊκών προδιαγραφών, που απαίτησαν την κατασκευή σημαντικών σηράγγων. Οι πρώτες μεγάλες σήραγγες σε αυτούς τους οδικούς άξονες, ήταν του Αρτεμισίου και του Μετσόβου, οι οποίες κατασκευάστηκαν τη δεκαετία του 1980 από το ΥΠΕΧΩΔΕ (ΕΥΔΕ-ΟΣΥΕ). Ο Πίνακας 1-5 περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά των πρώτων σημαντικών σηράγγων που κατασκεύασε το ΥΠΕΧΩΔΕ στην Ελλάδα από το 1985 μέχρι το 1995.



Σχήμα 1-25. Σύγχρονοι οδικοί άξονες

Πίνακας 1-5. Προ του 1995 σημαντικές σήραγγες ΥΠΕΧΩΔΕ, ΕΥΔΕ/ΟΣΥΕ, (Κωνσταντάκος, 1993)

α α	**Σήραγγα**	**Σκο -πός**	**Εργο-δότης**	**Αρχή- - Τέλος**	**Πλά τύψ ος**	**Μή-κος**	**Πετρώματα-νερά**	**Εκσκαφή-υποστήριξη**	**Μόνιμη επένδυση**	**Παρατη ρή-σεις**
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Αρτεμισί-ου	οδική	ΥΠΕΧΩ-ΔΕ	Β'1985 Β'1989	9.80 7.006	1354	Ασβεστόλι-θοι Κερατόλιθοι-Ραδιολαρί-τες Αργιλικός σχιστόλιθος	ΝΑΤΜ Εκτ. Σκυρ. ηλώσεις πλέγμα τοπικά πλαίσια	Αοπλο σκυρόδεμα Οπλισμός μεμονομέ-νων περιοχών d=0.3m	
2	Μετσό-βου α. κύρια β.αερισμού	οδική	ΥΠΕΧΩΔΕ	1985 1993	9.80 7.00	3500 1900	Φλύσχης περιδοτίτης σερπεντίνης κερατόλιθοι σχιστόλιθοι Γάβρος Βασάλτης Τοπικά σημαντική παρουσία νερού	Εκρηκτικά Ημιδιατομή ή τοπικά σε φάσεις Εκτ. Σκυρ. ηλώσεις πλέγμα πλαίσια		
3	Μαλακα-σιώτη	υδραυλική (εκτροπή χειμά-ρου)	ΥΠΕΧΩ-ΔΕ	1988	3.80 3.70	310	Βασάλτης Γάβρος	Εκρηκτικά σε πλήρη διατομή Εκτ. σκυρ. Ηλώσεις	Ανεπένδυ-τος θόλος	Υδραυλική διατομή Επένδυση του κάτω ημίσεως
4	Ανηλίου	οδική	ΥΠΕΧΩ-ΔΕ	8/1989 12/1991	9.80 7.25	350	Ψαμμίτες Μικρή περιοχή ιλυολίθου Μικρή παρουσία νερού	Εκρηκτικά Εκτ. σκυρ. Ηλώσεις Σποραδικά πλαίσια	Β225, d=0.4m οπλισμός στα θεμέλια και τοπικά στα στόμια	
5	Μαλακα-σίου Β	οδική	ΥΠΕΧΩ-ΔΕ	1/1990 12/1992	9.80 7.25	280	Περιδοτίτης σερπεντίνης κερατόλιθοι ραδιολαρί-τες παρουσία νερού	Εκρηκτικά και μηχανική εξόρυξη Εκτ. σκυρ. ηλώσεις δομικό πλέγμα πλαίσια	Ελαφρά οπλισμένη	
6	Διστόμου	υδραυλική (ύδρευση)	ΥΠΕΧΩ-ΔΕ	12/1990 6/1992	3.60 3.80	936	Ασβεστόλι-θος χωρίς νερό	Εκρηκτικά Εκτ. σκυρ. ηλώσεις πλέγμα σποραδικά πλαίσια	Ανεπένδυ-τος θόλος Σκυροδέτηση δαπέδου-παρειών	Επένδυση και αντιστήριξη με εκτοξευόμε-νο σκυρόδεμα
7	Τυμφρη-στού	οδική	ΥΠΕΧΩ-ΔΕ	2/1992	9.80 7.00	1350	Αργιλικός σχιστόλιθοςΙλυόλιθος, Ψαμμίτης Κροκ/παγή. Δίχως νερά	Εκτ. σκυρ. Ηλώσεις συστηματικά πλαίσια	d=03-0.4m	

8	Εκτρο-πής φράγμα-τος Ευήνου	υδραυλική	ΥΠΕΧΩ-ΔΕ	6/1992 10/1992	8.50 9.20	700	Φλύσχης Μικρή παρουσία νερού	ΝΑΤΜ Εκτ. σκυρ. πλέγμα ηλώσεις πλαίσια	Οπλισμένο σκυρόδεμα σε όλη τη διατομή	Λειτουργεί και ως σήραγγα εκκένωσης ταμιευτήρα
9	Προσαγω-γός ΕυήνουΜόρνου	υδραυλική	ΥΠΕΧΩ-ΔΕ	12/1992 2/1995	3.50	30000	Ασβεστόλιθος Φλύσχης Σημαντική ποσότητα νερού	35%TBM/NATM 65% TBM/segments	Εγχυτο σκυρόδεμα - Προκατασκευασμένα στοιχεία	Υδραυλική σήραγγα υπό πίεση

Στη συνέχεια οι περισσότερες σήραγγες κατασκευάστηκαν από την ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟ ΑΕ και τον ΠΑΘΕ. Ο Πίνακας 1-6 περιλαμβάνει τις μεγαλύτερες σήραγγες τους.

Πίνακας 1-6 Μεγάλες σήραγγες Εγνατίας οδού και ΠΑΘΕ

Περιφέρεια	**Ονομασία Σήραγγας**	**Μήκος σε μέτρα**	**Φορέας**	**Γεωλογικοί Σχηματισμοί**
Ήπειρος	Δωδώνη	3.350	ΕΓΝΑΤΙΑ	Ασβεστόλιθος
Ήπειρος	Δρίσκου	4.590	ΕΓΝΑΤΙΑ	Φλύσχης
Ήπειρος	Τ8	2.635	ΕΓΝΑΤΙΑ	Φλύσχης
Ήπειρος	Μετσόβου*	3.550	ΕΓΝΑΤΙΑ	Οφιόλιθοι / Φλύσχης
Θεσσαλία	Παναγιάς	2.700	ΕΓΝΑΤΙΑ	Γάββροι/ Οφιόλιθοι/ Κερατολιθοι
Θεσσαλία	Τεμπών Τ2	6.000	ΠΑΘΕ	Ασβεστόλιθος
Στερεά	Κνημίδας	2500	ΠΑΘΕ	Δολομιτικός ασβεστόλιθος
Κεντρική Μακεδονία	Σ10	2.240	ΕΓΝΑΤΙΑ	Γνεύσιοι / Γρανίτες

** Αναφέρεται και στον προηγούμενο πίνακα, καθόσον ο πρώτος κλάδος κατασκευάσθηκε από το ΥΠΕΧΩΔΕ*

Στην κεντρική Ελλάδα κατασκευάζεται νέο υποτμήμα «Τέμπη-Σκοτίνα» του αυτοκινητόδρομου ΠΑΘΕ. Στα 26 km του υποτμήματος αυτού περιλαμβάνονται τρεις δίδυμες ανά κατεύθυνση σήραγγες (συνολικά δηλαδή 6), στα Τέμπη και στον Πλαταμώνα. Πρόκειται για 2×11 km: μία δίδυμη 2×2km, μια 2×6 km και μια 2×3 km. Κάθε 300 m υπάρχουν έξοδοι διαφυγής για πεζούς και κάθε 900 m για Ι.Χ. Σε περίπτωση έκτακτου περιστατικού μπορούν τα αυτοκίνητα μέσω εσωτερικής πόρτας να περνούν από τη μία στην απέναντι, προς την αντίθετη κατεύθυνση. Τον ΠΑΘΕ με την ΕΓΝΑΤΙΑ Οδό θα συνδέει ο νέος αυτοκινητόδρομος Κεντρικής Ελλάδας Ε65 που περιλαμβάνει σήραγγες 10km. Στη δυτική Ελλάδα κατασκευάζεται η Ιονία Οδός μήκους 382km με τρεις λωρίδες ανά κατεύθυνση που περιλαμβάνει 4 ήδη κατασκευασμένες δίδυμες σήραγγες, της Μακύνειας, της Καλυδώνας, της Κλόκοβας (Σχήμα 1-26) και της Αμπελιάς.



Σχήμα 1-26. Βόρεια στόμια σήραγγας Κλόκοβας, κατά την κατασκευή (Απρίλιος 2016).

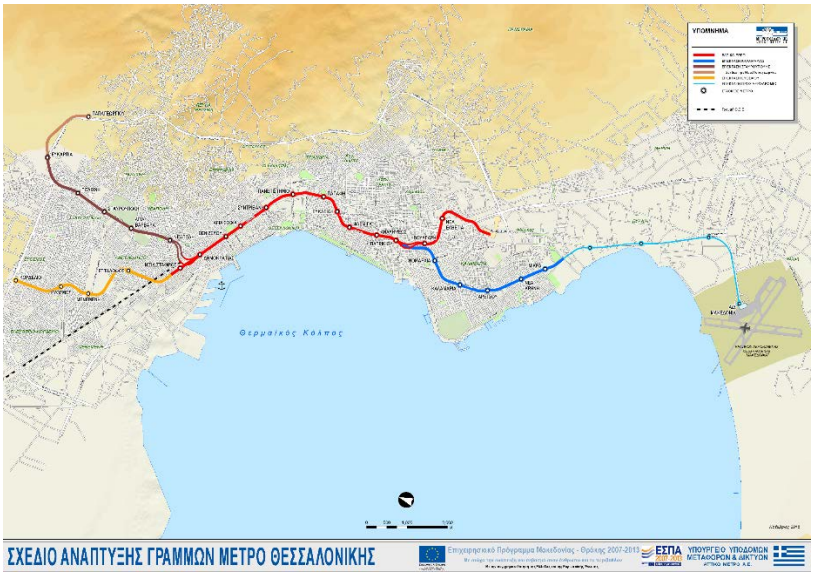
Στην Πελοπόννησο κατασκευάζονται δύο μεγάλοι οδικοί άξονες, στην ανατολική και στη βορειοδυτική Πελοπόννησο. Ο ανατολικός αυτοκινητόδρομος Κόρινθος-Τρίπολη-Καλαμάτα-Λεύκτρο-Σπάρτη, με την επωνυμία ΜΟΡΕΑΣ έχει μήκος 205 km με τρεις λωρίδες ανά κατεύθυνση. Στο τμήμα Κόρινθος-Τρίπολη έχουν κατασκευαστεί δύο σήραγγες μήκους 600m, και ο δεύτερος κλάδος της σήραγγας Αρτεμισίου και ανακατασκευάστηκε ο υπάρχων κλάδος. Ο βορειοδυτικός αυτοκινητόδρομος Κόρινθος-Πάτρα-Πύργος-Τσακώνα κατασκευάζεται σε μεγάλο τμήμα του από την αρχή. Το τμήμα Κόρινθος-Πάτρα περιλαμβάνει 15 νέες σήραγγες, ενώ το τμήμα Πάτρα μέχρι Τσακώνα περιλαμβάνει άλλες 6 νέες σήραγγες.

1.5.3.1 Σήραγγες Μετρό

Από την ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ κατασκευάζονται τα δίκτυα μετρό Αθήνας και Θεσσαλονίκης. Στο Μετρό της Αθήνας (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ, 2007) συνεχίζεται η επέκταση της γραμμής 3 από Αγία Μαρίνα προς Πειραιά (Σχήμα 1-27α) που προβλέπεται να ολοκληρωθεί το 2019. Τώρα ξεκινάει η δημοπράτηση για την κατασκευή της γραμμής 4 στο τμήμα Άλσος Βεΐκου-Γουδή. Στη Θεσσαλονίκη η κατασκευή του μετρό (Σχήμα 1-27β) συνεχίζεται και αναμένεται να ολοκληρωθεί εντός του 2020.



(α) Επέκταση γραμμής 3 μετρό Αθήνας



(β) Μετρό Θεσσαλονίκης

Σχήμα 1-27. Δίκτυα μετρό

1.6 Το μέλλον στις σήραγγες

1.6.1 Εξέλιξη στις απαιτήσεις

Η εξάντληση του επίγειου χώρου σε συνδυασμό με την αύξηση του πληθυσμού οδηγεί στην ανάγκη επέκτασης των ανθρώπινων δραστηριοτήτων στην τρίτη διάσταση μέσα στη γη. Υπόγεια έργα επομένως θα απαιτηθούν τόσον στην ύπαιθρο όσον και στις αστικές περιοχές. Ένας εγγενής μεγάλος κίνδυνος σε αυτά τα έργα, λόγω του κλειστού χώρου είναι η πυρκαγιά. Ο Πίνακας 1-7 δίνει τις επιπτώσεις από καταστροφικές πυρκαγιές σε σήραγγες υπό λειτουργία στο διάστημα 1987-2001, και ο Πίνακας 1-8 τέτοια συμβάντα κατά την κατασκευή.

Πίνακας 1-7. Πυρκαγιές σε σήραγγες κατά τη λειτουργία (Εργοταξιακά θέματα, 3/2003)

α/α	Σήραγγα	Χώρα/πόλη	Ημερομηνία	Νεκροί
1	Gotthard	Ελβετία	10/2001	11
2	Kaprin	Αυστρία	11/2000	155
3	Mont Blanc	Γαλλία-Ιταλία	3/1999	39
4	Tauern	Αυστρία	5/1999	12
5	King's Cross	Λονδίνο, ΗΒ	10/1987	31
6	Eurotunnel	ΗΒ - Γαλλία	11/1994	-
7	Isola selle Femmine	Ιταλία	1996	5
8	Pfander	Αυστρία	1995	3
9	Serra a Ripoli	Ιταλία	1993	4

Πίνακας 1-8. Πυρκαγιές σε σήραγγες κατά την κατασκευή (Εργοταξιακά θέματα, 3/2003)

α/α	Σήραγγα	Χώρα/πόλη	Ημερομηνία	Νεκροί
1	A686 Τρένο μεταφοράς τυλίγεται στις φλόγες	Παρίσι, Γαλλία	3/2002	-
2	Storebaelt Μηχάνημα εκσκαφής πιάνει φωτιά	Δανία	6/1994	--

Η Ευρωπαϊκή Ένωση με την οδηγία ασφάλειας οδικών σηράγγων επιβάλλει πρότυπα για της σήραγγες που μειώνουν τη διακινδύνευση εφόσον εκδηλωθεί πυρκαγιά. Τα πρότυπα αυτά αναφέρονται μεταξύ άλλων, στην ύπαρξη ελαχίστων εξόδων διαφυγής και στη δυνατότητα επαρκούς εξαερισμού.

1.6.2 Υπεραστικά συγκοινωνιακά έργα

Στην ύπαιθρο, μεγάλο μέρος των υπογείων έργων θα είναι συγκοινωνιακά. Η κατασκευή των συγκοινωνιακών σηράγγων απαιτείται για τη δημιουργία αξόνων μεγάλης κυκλοφοριακής ικανότητας. Οι σύγχρονες υπερταχείες σιδηροδρομικές αμαξοστοιχίες απαιτούν μέχρι και το μισό της χάραξής τους να κατασκευάζεται υπόγεια, ενώ οι ιταλικοί αυτοκινητόδρομοι κατασκευάζονται σε ποσοστό 35% έως 45% υπόγειοι. Με τις σήραγγες επιτυγχάνεται επίσης η παράκαμψη δύσκολων περασμάτων, η προστασία από χιονοστιβάδες ή κατολισθήσεις, η διάβαση ποταμών, πορθμών ή στενών και η παράκαμψη δομημένων περιοχών. Σύντομα προβλέπεται να κατασκευασθούν σήραγγες που κανείς ως σήμερα δε θα τολμούσε να διανοηθεί, όπως κάτω από τη θάλασσα σε πολύ υψηλές πιέσεις νερού, μέσα σε πετρώματα σε βάθη πολλών χιλιομέτρων κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, μέσα σε πολύ πτωχά εδάφη, κ.α. Συχνά το μήκος των σχεδιαζόμενων σηράγγων θα είναι πολλές δεκάδες χιλιόμετρα. Στις σήραγγες αυτές θα αντιμετωπιστούν δυσκολίες που θα οφείλονται σε παράγοντες όπως:

- Η απόσταση του μετώπου. Έχει επίδραση στην ποσότητα του εισρέοντος νερού και κυρίως στο χρόνο μεταφοράς του εργατικού δυναμικού και αποκομιδής των υλικών εκσκαφής. Δεν αποτελεί ανυπέρβλητη δυσκολία στην κατασκευή μεγάλων μηκών.
- Ο εξαερισμός της περιοχής του μετώπου. Η απαίτηση σε αέρα μειώνεται σημαντικά με τη χρήση ηλεκτρικών οχημάτων μεταφοράς.
- Η θερμότητα των πετρωμάτων. Αντιμετωπίζεται με κατάλληλη επιλογή του εξαερισμού.
- Η πίεση του περιβάλλοντος πετρώματος. Η υψηλή πίεση έχει ως αποτέλεσμα την θραύση ή τη βαθμιαία σύγκλιση των παρειών της σήραγγας. Η πρώτη συνήθως περιορίζεται σε βάθος μικρότερο των 2 μέτρων από την παρειά και δύναται να αντιμετωπισθεί με την τοποθέτηση ήλων ή άλλων μέτρων στήριξης του πετρώματος. Η δεύτερη αποτελεί πρόβλημα σημαντικό κατά τη χρήση μηχανών διάτρησης σηράγγων, καθόσον υφίσταται ο κίνδυνος εγκλωβισμού της μηχανής.
- Ο κίνδυνος εισροής νερού υπό πίεση. Αποτελεί μεγάλο πρόβλημα κατά τη διάνοιξη σηράγγων σε μεγάλα βάθη, εκθέτοντας σε μεγάλο κίνδυνο τους εργαζόμενους και σε καταστροφή τα μηχανήματα.
- Η αδυναμία γεωλογικής αναγνώρισης λόγω μεγάλου βάθους. Στις μεγάλου μήκους σήραγγες (π.χ. > 15 km) το βάθος συνήθως είναι σημαντικό και η υπερκείμενη επιφάνεια του εδάφους είναι δύσκολα προσπελάσιμη. Είναι φυσικό επομένως το κόστος της γεωλογικής αναγνώρισης και η γενική αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων να προκαλεί ατολμία με αποτέλεσμα την καθυστέρηση έναρξης του έργου. Παρόλα αυτά, εφόσον υπάρχει επιθυμία κατασκευής του έργου, υπάρχει η δυνατότητα σύνταξης επαρκώς λεπτομερούς γεωλογικής αποτύπωσης που θα επιτρέπει να γίνουν ορθολογικές επιλογές.
- Ο χρόνος διάρκειας της κατασκευής. Η κατασκευή μίας συγκοινωνιακής σήραγγας μήκους 25 km που εκσκάπτεται από ένα μόνο μέτωπο με εκρηκτικά και που δεν συναντά σημαντικά προβλήματα απαιτεί περίπου 12 χρόνια για να παραδοθεί σε χρήση. Είναι φανερό επομένως ότι για σήραγγες πολύ μεγάλου μήκους απαιτείται η χρήση ενδιάμεσων μετώπων ώστε να μειωθεί ο χρόνος εκσκαφής του έργου.
- Το κόστος C της κατασκευής. Αυτό μεταβάλλεται στις οδικές σήραγγες μη γραμμικά με το μήκος L, λόγω των αναγκών εξαερισμού. Για μήκη μεγαλύτερα από 2 km δίνεται από τη σχέση $C = a \cdot L^{1.36}$, όπου a είναι κάποια σταθερά αναλογίας. Για σιδηροδρομικές σήραγγες το κόστος μεταβάλλεται περίπου γραμμικά με το μήκος.
- Ειδικά στις οδικές σήραγγες μεγάλου μήκους, τα προβλήματα θα οφείλονται σε παράγοντες όπως:

Ο εξαερισμός κατά τη λειτουργία. Για μεγάλα μήκη (>20 - 25 km) απαιτείται η κατασκευή ενδιάμεσων φρεάτων ή στοών εξαερισμού.

Η κλειστοφοβία και ανία. Προκαλείται από τη μεγάλη και μονότονη διαδρομή. Θα πρέπει να αντιμετωπίζεται με την κατασκευή σηράγγων επαρκούς πλάτους, εμφανών ορίων, καθαρών, με καλή σήμανση, καλά φωτισμένων, και που θα δίνουν τη δυνατότητα στους οδηγούς να έχουν σημεία αναφοράς.

1.6.3 Αστικά έργα

Σύμφωνα με μελέτη του ΟΗΕ, το 50% του πληθυσμού της γης - που έχει φτάσει τα ~8 δισεκατομμύρια - κατοικεί σε μεγάλες πόλεις. Υπάρχουν δε πολλές μεγαλουπόλεις με δεκάδες εκατομμυρίων κατοίκων, όπως το Tokyo με ~30 εκατομμύρια, το Sao Paulo, η Bombay, η Shanghai, το Lagos, το Mexico City με ~25 εκατομμύρια, το Beijing, η Dacca, η New York, και η Djakarta με ~20 εκατομμύρια.

Μολονότι η τεχνολογία ποτέ δεν θα μπορέσει να αντισταθμίσει τις επιπτώσεις του υπερπληθυσμού στη γη, η σηραγγοποιία θα επιχειρεί να συνεισφέρει στη βιώσιμη ανάπτυξη για τις μελλοντικές κοινωνίες των πόλεων (Duddeck, 1996) με το να προσφέρει, πόσιμο νερό, υγιεινά αποχετευτικά συστήματα, υπόγειες συγκοινωνίες, και εγκαταστάσεις για ενέργεια, απορρίμματα, αποθήκευση, και διαμονή (Meijenfeldt, 2003) κάτω από την επιφάνεια. Ο έλεγχος των καθιζήσεων λόγω της διάνοιξης κάτω από δομημένες περιοχές σε δύσκολα εδάφη, όπως της Mexico City και της Bangkok, θα είναι ένα από τα μεγάλα προβλήματα που θα πρέπει να αντιμετωπιστούν.

1.6.4 Μελλοντικό πλαίσιο αποφάσεων

Η εφικτότητα της κατασκευής σηράγγων τεκμηριώνεται με γενικά με καθαρά οικονομικά κριτήρια, μολονότι οι επιπτώσεις τους είναι ιδιαίτερα σημαντικές στη βελτίωση των κοινωνικών και περιβαλλοντικών συνθηκών, όπως π.χ. στην περίπτωση κατασκευής μετρό. Αν όμως μέχρι σήμερα τα κριτήρια εφικτότητας της κατασκευής σηράγγων τα προσδιόριζε η οικονομία της αγοράς, τώρα αρχίζουν να υπεισέρχονται στο σχεδιασμό και παράγοντες κοινωνικοί και περιβαλλοντικοί. Έτσι παρατηρούμε στη Νορβηγία την κατασκευή υποπυθμένιων σηράγγων διάβασης σε μικρά νησιά που δικαιολογούνται μόνο με κοινωνικά και όχι με οικονομικά κριτήρια. Οι σήραγγες βελτιώνουν και την αισθητική του τοπίου με την αποφυγή της κατασκευής υψηλών αντιαισθητικών ορυγμάτων στις επιφανειακές χαράξεις. Το βελτιώνουν επίσης με τη μείωση της κατάληψης της δασικής, αγροτικής και αστικής γης από τα οδοστρώματα, της ηχορύπανσης, του διαχωρισμού των κατοικημένων περιοχών, της ρύπανσης λόγω της ρίψης άλατος στους δρόμους για την αντιμετώπιση του παγετού, κ.α. Δύνανται όμως να επηρεάσουν αρνητικά το περιβάλλον με τη φθορά της χλωρίδας και τη διατάραξη της πανίδας, τη διαφοροποίηση του καθεστώτος επιφανειακών και υπόγειων νερών με τη στράγγισή τους και τη μόλυνσή τους από τα υλικά κατασκευής, την αέρια και ηχητική ρύπανση, την οπτική υποβάθμιση του τοπίου, τις ενδεχόμενες καθιζήσεις, και τις επιπτώσεις στο οικονομικό και κοινωνικό περιβάλλον. Στην περιβαλλοντική μελέτη της κατασκευής και λειτουργίας μίας σήραγγας η εκτίμηση των παραπάνω περιβαλλοντικών επιπτώσεων έχει σαν στόχο (Κωστόπουλος, 2013) να υποδείξει την περιβαλλοντικά προσφορότερη θέση για το έργο, εφόσον απαιτείται, και να προσδιορίσει τα προληπτικά μέτρα ώστε να ελαχιστοποιηθεί η επιβάρυνση του περιβάλλοντος της περιοχής.

Η κατασκευή υπογείων έργων έχει να αντιμετωπίσει όμως, εκτός από τεχνικά, και νομικά προβλήματα. Το θέμα της ιδιοκτησίας κάτω από τη γη παρουσιάσθηκε τον προηγούμενο αιώνα όταν προτάθηκε η κατασκευή του μετρό στο Λονδίνο. Ο χώρος αυτός μέχρι πριν από μερικές δεκαετίες ήταν παρθένος, σήμερα όμως αρχίζει να καταλαμβάνεται όλο και πιο πολύ. Η περαιτέρω διάνοιξη των σηράγγων επομένως, και ιδιαίτερα κάτω από τις μεγαλουπόλεις, θα απαιτήσει νέα αντιμετώπιση, ώστε να καθοριστεί ο διαθέσιμος υπόγειος χώρος. Η λεπτομερής χαρτογράφησή του και ο εκσυγχρονισμός της νομοθεσίας που διέπει το ιδιοκτησιακό του καθεστώς θα δώσουν την καινούργια βάση για την παραπέρα ανάπτυξή του.

Βιβλιογραφία

Agricola Georgius (1556). "DE RE METALLICA", translated by: Hoover HC & Hoover LH (1950), Dover Publications Inc, New York.

Anagnostou G and Ehrbar (eds) (2013). "Tunnelling Switzerland", STS & ETH Zürich.

Anon (1970). «Προϊστορία και Πρωτοϊστορία», Ιστορία του Ελληνικού Έθνους, Τόμος Α΄, Εκδοτική Αθηνών.

ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ (2007). «Στοιχεία του Έργου», ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΑΕ.

Beek van J, Ceton NM-O'Prinsen, Tan GL (2003). "Tunnels in the Netherlands – a new generation", Ministry of Transport, Public Works and Water Management.

Δρανδάκης Π. (-) "Μεγάλη Ελληνική Εγκυκλοπαίδεια", ΚΑ΄, 733-742, Φοίνιξ ΕΠΕ

Duddeck H (1996). "Challenges to Tunnelling Engineers", TUST, 11, 1, 5-10.

Εργοταξιακά θέματα (3/2003).

Grose B, Macklin S and Yeow H (2005). "Numerical Tunnel Design – how far have we come?", T&T International, 2005, May, 40-43.

Kovári K and Descoeudres F (2001). "Tunnelling Switzerland", Swiss Tunnelling Society.

Kovári K and Fechtig R (2000). "Historical Tunnels in the Swiss Alps – Gotthard, Simplon, Lötschberg", Vol. 2, Society for the Art of Civil Engineering.

Κωνσταντάκος Μ. (1993). «Σήραγγες ΥΠΕΧΩΔΕ», ΕΥΔΕ/ΟΣΥΕ

Κωστόπουλος ΣΔ (2013). «Σήραγγες-Κατασκευαστική Τεχνική, Υπολογιστική διερεύνηση, Συμβασιακά θέματα», ΙΩΝ.

Maidl B. (2004). "Handbuch des Tunnel- und Stollenbaus", Band I, – ch.3", Gluckauf

Meijenfeldt von Ernst et al. (2003). "Below Ground Level - Creating new spaces for contemporary Architecture", Birkhäuser.

Μπαρούνης ΑΝ (1958). «Σήραγγες, Τόμος 1», Μπαρούνης

Müller L - Salzburg (1984). "Der Felsbau - Dritter Band: Tunnelbau", ch. 16.5, Enke

NRLA (2006). "NewRail Link through thwe Alps: A Swiss Pioneer Achievement", EUROCK 2010, Society for the art of civil engineering.

Rziha Fr (1874). "Lehrbuch der gesamten Tunnelbaukunst", Berlin, Bd II.

Sandström GE (1963). "The History of Tunnelling", Barrie & Rockliff, London.

Σοφιανός Α.Ι. (2001) «Από τις σήραγγες στις υποθαλάσσιες ζεύξεις», σελ. 16-17, ΕΞΠΡΕΣ, 39, Μάιος

Σοφιανός ΑΙ (1987). «Προσωπικό Αρχείο»

Σταματιάδης ΕΙ (1884). «Περί του Ορύγματος του Ευπαλίνου εν Σάμω», Επιστημονική Εταιρεία Τεχνολόγων Ορυκτού Πλούτου.

Széchy K (1967). "The Art of Tunnelling", Akademiai Kiado.

Whittaker BN and Frith RC (1990). "Tunnelling, Design, Stability and Construction", IMM.

Wood Alan Muir (2000). "Tunnelling – Management by Design", E & FN Spon.

Χαραλαμπάκης Χρ. (2006). «Προσωπική επικοινωνία»

Ζερβαντωνάκης Κ (2001). «Αρχαίες σήραγγες», Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ.

Κριτήρια αξιολόγησης

Κριτήριο αξιολόγησης 1

Δώστε υπό κατάλληλη κλίμακα εγκάρσιες τομές των φάσεων εκσκαφής-αντιστήριξης πεταλοειδούς σήραγγας, στην οποία να χωράει τετράγωνο 6×6m (περιτύπωμα ωφέλιμης διατομής) και τοίχωμα επένδυσης πάχους 1m, διανοιγόμενης με τη Γερμανική μέθοδο.

Απάντηση/Λύση

Κριτήριο αξιολόγησης 2

Δώστε υπό κατάλληλη κλίμακα εγκάρσιες τομές των φάσεων εκσκαφής-αντιστήριξης πεταλοειδούς σήραγγας, στην οποία να χωράει τετράγωνο 6×6m (περιτύπωμα ωφέλιμης διατομής) και τοίχωμα επένδυσης πάχους 1m, διανοιγόμενης με την Παλαιά Αυστριακή μέθοδο.

Απάντηση/Λύση

Κριτήριο αξιολόγησης 3

Δώστε υπό κατάλληλη κλίμακα εγκάρσιες τομές των φάσεων εκσκαφής-αντιστήριξης πεταλοειδούς σήραγγας, στην οποία να χωράει τετράγωνο 6×6m (περιτύπωμα ωφέλιμης διατομής) και τοίχωμα επένδυσης πάχους 1m, διανοιγόμενης με τη Βελγική μέθοδο.

Απάντηση/Λύση

Κριτήριο αξιολόγησης 4

Διερευνείστε το νομικό καθεστώς ιδιοκτησίας του υπογείου χώρου στην Ελλάδα.

Απάντηση/Λύση

Κεφάλαιο 2

Σύνοψη
Η μορφή των υπογείων έργων ποικίλει ανάλογα με το σκοπό που επιτελούν. Αναφέρονται τα είδη των υπογείων έργων, και στη συνέχεια αναπτύσσεται ο γεωμετρικός σχεδιασμός των σηράγγων που διανοίγονται κατά την κατασκευή τεχνικών έργων. Εμπέδωση επιτυγχάνεται με λυμένα παραδείγματα και ασκήσεις.

Προαπαιτούμενη γνώση
Μαθήματα: Οδοποιία, Σιδηροδρομική. Χρήσιμη βιβλιογραφία.Bickel et al. (1996).

2. Μορφή των σηράγγων

2.1 Εισαγωγή

Η μορφή της σήραγγας εξαρτάται από το είδος του έργου και τον σκοπό τον οποίο επιτελεί.

2.1.1 Είδη υπογείων έργων

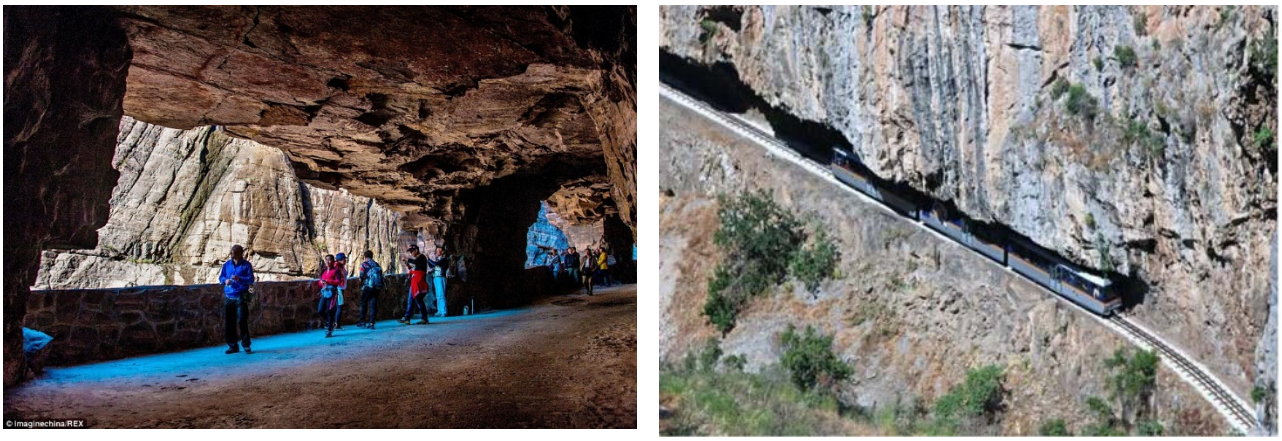
Η διαμόρφωση των υπόγειων έργων εξαρτάται κυρίως από το είδος τους. Από πλευράς σκοπού, διακρίνονται σε μεταλλευτικά και σε τεχνικά. Τα μεταλλευτικά υπόγεια έργα, όπως τα φρέατα, οι ράμπες και οι στοές, εξυπηρετούν την εξόρυξη και αποκόμιση του μεταλλεύματος κατά τη λειτουργία του μεταλλείου, και η μορφή τους προσαρμόζεται στις επί τόπου ανάγκες και συνθήκες. Αντίθετα, τα τεχνικά υπόγεια έργα εξυπηρετούν πληθώρα συγκεκριμένων αναγκών της πολιτείας, για κάθε μία από τις οποίες προδιαγράφεται αυστηρά η μορφή (διατομή, μηκοτομή, κλπ) χρήσης.

Ανάλογα με τη χρήση τους τα τελευταία διακρίνονται σε:
- Συγκοινωνιακά, όπως π.χ. σήραγγες σιδηροδρομικές , αστικού σιδηροδρόμου ΜΕΤΡΟ, οδικές, πεζών, ναυσιπλοΐας, κλπ.
- Μεταφοράς, όπως π.χ. σήραγγες ύδρευσης, αποχέτευσης, εκτροπής, εκκένωσης πυθμένα, προσαγωγής, φυγής, καλωδίων, εκτόνωσης πίεσης, μεταφοράς υγρών ή αερίων, μεταφορικών ιμάντων, κλπ.
- Στάθμευσης, όπως π.χ. πολυώροφα υπόγεια γκαράζ.
- Αποθήκευσης υλικών.
- Διαμονής, όπως τα καταφύγια, τα υπόγεια αθλητικά κέντρα, κλπ.
- Παραγωγής, όπως σταθμοί παραγωγής ενέργειας, χώροι μετασχηματιστών κλπ.
- Φρέατα, όπως π.χ. προσπέλασης και αερισμού.
- Βοηθητικά, τσιμεντενέσεων, αποστραγγίσεων, κλπ.
- Φυσικών πειραμάτων, όπως τα υπόγεια εργαστήρια (URL) και οι σήραγγες επιταχυντών αδρονίων (LHC), όπως π.χ. η σήραγγα LHC του CERN, κυκλικής χάραξης διαμέτρου 9 χιλιομέτρων, που βρίσκεται σε βάθος πάνω από 100 μέτρα κάτω από τα γαλλο-ελβετικά σύνορα κοντά στη Γενεύη της Ελβετίας.

Ανάλογα με τη μορφή τους, τα υπόγεια τεχνικά έργα διακρίνονται ως εξής :
- Θάλαμοι (Caverns). Είναι χωρικά ανοίγματα μεγάλων διαστάσεων.
- Σήραγγες. Είναι επιμήκη οριζόντια ή παρα-οριζόντια ανοίγματα εμβαδού διατομής έως και 300 m^2 ή και περισσότερο, που γενικά καταλήγουν σε δύο στόμια.

- Στοές. Αυτές είναι επιμήκη (μεταλλευτικά συνήθως) ανοίγματα, μικρού εμβαδού διατομής μέχρι 30 m^2, και μικρής κλίσης, δηλ. έως 10^o, που γενικά καταλήγουν μόνον στο ένα άκρο τους σε στόμιο. Για κλίσεις από 10^o έως 45^o ονομάζονται επικλινείς στοές. Οι στοές γενικά δεν έχουν μόνιμη λειτουργία.
- Σήραγγες μικρής διαμέτρου. Είναι επιμήκη οριζόντια ανοίγματα μικρότερης διατομής με διάμετρο από 0.90 έως 3.0 m.
- Μικροσήραγγες. Είναι επιμήκη οριζόντια ανοίγματα, με ύψος μικρότερο από 0.90 μέτρα, μέσα στα οποία δεν μπορεί να κινηθεί άνετα άνθρωπος.
- Φρέατα Είναι επιμήκη κατακόρυφα ορύγματα. Για κλίσεις μεταξύ 90^o και 45^o ονομάζονται επικλινή φρέατα.

Οι υπεραστικές σήραγγες διακρίνονται ανάλογα με τη χάραξή τους σε :
- Εγκάρσιες, όταν προσβάλουν κάθετα το ορεινό αντέρεισμα.
- Κορυφής, όταν ο ορεινός σχηματισμός διατέμνεται εγκάρσια σε ανώτερο σημείο του.
- Βάσης, όταν ο ορεινός σχηματισμός διατέμνεται εγκάρσια στο ύψος της πεδιάδας.
- Κλιτύος, όταν ο ορεινός σχηματισμός διατέμνεται παράλληλα προς την παράταξη του αντερείσματος.
- Σήραγγες με παράθυρα (Σχήμα 2-1), που είναι σήραγγες κλιτύος με πολλά παράθυρα προς αυτή. Στο σχήμα δεξιά, παρατηρούμε σήραγγα με τοίχωμα από τη μία πλευρά μόνο.
- Σήραγγες υποποτάμιες ή κάτω από την κοιλάδα.
- Σήραγγες υποθαλάσσιες, που μπορεί να είναι υποπυθμένιες, ποντιζόμενες επιπυθμένιες, και υποβρύχιες στηριζόμενες σε στύλους ή από αγκύρια.
- Ελικοειδείς ή ράμπες.



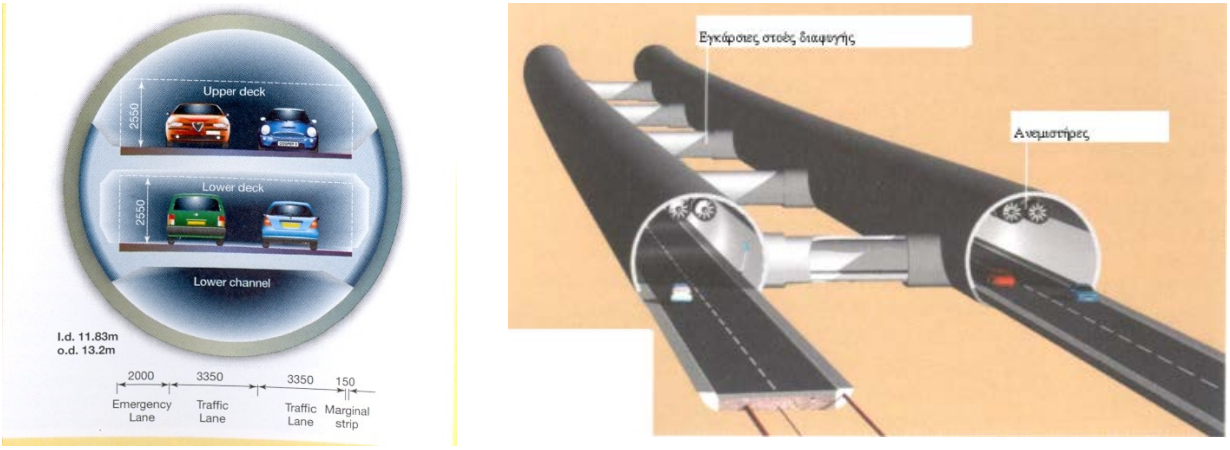
(α) Σήραγγα Guoliang στην Κίνα, με περισσότερα από 30 παράθυρα *(β) Μονόπλευρη σιδηροδρομική σήραγγα*

Σχήμα 2-1. Σήραγγες σε απότομες κλιτείς (Πηγή: Διαδίκτυο)

Τα υπόγεια τεχνικά έργα διακρίνονται ανάλογα με τη μηχανική λειτουργία τους σε :
- Εξωτερικής πίεσης πετρώματος ή ύδατος
- Εσωτερικής πίεσης υγρού, διαρκούς ή διακοπτόμενης
- Στεγανά διήθησης νερού από το πέτρωμα προς το άνοιγμα
- Στεγανά διήθησης υγρού ή αερίου από το άνοιγμα προς το πέτρωμα

Μία σήραγγα σύμφωνα με το σχήμα της διατομής της ονομάζεται: κυκλική, πολυγωνική, ορθογωνική, αψιδωτή, πεταλοειδής, διπλή, διώροφη, δίδυμη (Σχήμα 2-2), κλπ. Τα υπόγεια έργα διακρίνονται ανάλογα με τον τρόπο υποστήριξης τους σε ανυποστήρικτα, ηλωμένα, υποστηριγμένα με πλαίσια, οπισθογεμισμένα, με αψίδα και βάθρο, σκυροδετημένα, ανοικτού δαπέδου, κλειστού σωλήνα, δύσκαμπτου σωλήνα, εύκαμπτου σωλήνα, σωλήνα ενός ή δύο κελυφών, κλπ.

Τα υπόγεια έργα διακρίνονται σύμφωνα με το υλικό της υποστήριξής τους σε επιλεκτικά (σποραδικά) υποστηριγμένα, υποστηριγμένα με ξυλοδεσιά, επενδυμένα με σκυρόδεμα, επενδυμένα με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ή κονίαμα, επενδυμένα με οπλισμένο σκυρόδεμα, λιθόκτιστα, επενδυμένα με προκατασκευασμένα στοιχεία σκυροδέματος, κλπ..



Σχήμα 2-2. Αριστερά: Διώροφη σήραγγα. Δεξιά: Δίδυμη σήραγγα.

2.1.2 Γενικά γεωμετρικά στοιχεία

Η χάραξη μίας σήραγγας εντάσσεται στο γενικότερο σχεδιασμό του ολοκληρωμένου έργου που την περιλαμβάνει. Ειδικότερα, για τις οδικές, σιδηροδρομικές και αστικού σιδηροδρόμου (μετρό) σήραγγες, υπάρχουν προδιαγραφές τόσο για το σχήμα της διατομής χρήσης, όσο και για τις επιτρεπόμενες κλίσεις, επικλίσεις και ακτίνες καμπυλότητας της χάραξης. Γενικά οι καμπύλες χαράξεις θα πρέπει να αποφεύγονται για κατασκευαστικούς λόγους, όταν όμως τούτο δεν είναι εφικτό, οι διαστάσεις της διατομής θα πρέπει να αυξάνονται στις συγκοινωνιακές σήραγγες, ώστε να λαμβάνεται υπόψη η χορδή που σχηματίζεται από τα οχήματα, η φυγόκεντρη κίνηση, η επίκλιση και η υποχώρηση των αναρτήσεων των οχημάτων.

Δύο είναι οι βασικές διατομές χαρακτηρισμού του σχήματος μίας σήραγγας, η μία αναφέρεται στην εκσκαφή και η άλλη στη χρήση. Η διατομή χρήσης εξαρτάται από κανονισμούς και λειτουργικές απαιτήσεις της σήραγγας, όπως ταχύτητα και διαστάσεις οχημάτων, ποσότητα και ταχύτητα νερού, φερτά υλικά κλπ. Για μεγάλες διατομές οδικών σηράγγων και όταν δεν υπάρχουν στατικοί ή άλλοι λόγοι εφαρμόζεται η πεταλοειδής διατομή με διάφορες παραλλαγές αναλόγως λειτουργικών κριτηρίων. Για σήραγγες μεταφοράς νερού υπό πίεση εφαρμόζεται συνήθως η κυκλική διατομή. Για υπονόμους εφαρμόζονται διατομές ωοειδείς, κυκλικές ή πεταλοειδείς με αύλακα πυθμένα. Οι ποντισμένες σήραγγες είναι ορθογώνιας διατομής (PIARC, -).

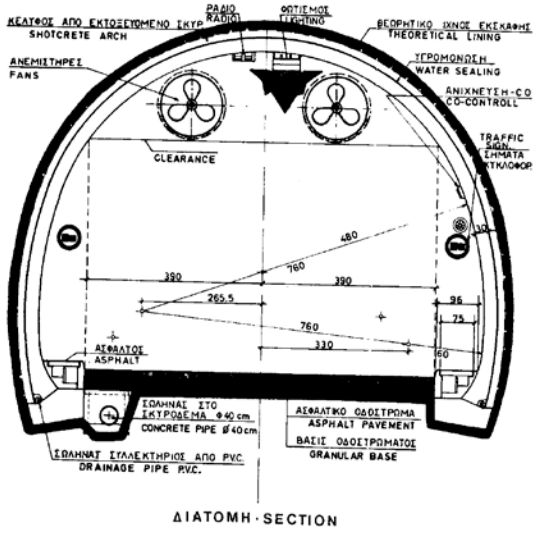
Η διατομή εκσκαφής μπορεί να είναι διαφορετικής μορφής από τη διατομή χρήσης της σήραγγας. Τούτο συμβαίνει κυρίως όταν η εκσκαφή γίνεται με μηχανή ολομέτωπης κοπής οπότε το σχήμα της διατομής εκσκαφής κατασκευάζεται κυκλικό (εκτός ειδικών περιπτώσεων). Άλλως η διατομή εκσκαφής της σήραγγας καθορίζεται συνήθως από το σχήμα της διατομής χρήσης. Κατά τη μελέτη διαμόρφωσης του σχήματος και των διαστάσεων της διατομής εκσκαφής μίας σήραγγας θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στα μεν εδάφη η σύγκλιση των παρειών που ισοδυναμεί με υποεκσκαφή της σήραγγας, στα δε πετρώματα η υπερεκσκαφή, δηλ. η εκσκαφή του πετρώματος πέραν της προβλεπόμενης. Η τελευταία συνεπάγεται πρόσθετη μεταφορά μπαζών καθώς και πρόσθετη ποσότητα, σκυροδέματος συνήθως, για την πλήρωσή της. Μέρος αυτής δικαιολογείται ως αναπόφευκτη καθόσον προκύπτει σαν αποτέλεσμα του τεκτονισμού και της αντοχής του πετρώματος καθώς και της μεθόδου της εκσκαφής. Η παρακολούθηση της χάραξης και της διατομής της σήραγγας κατά την κατασκευή της γίνεται με σύγχρονα τοπογραφικά όργανα.

2.2 Γεωμετρικός σχεδιασμός οδικών σηράγγων (Σακκάς, et al., 2002)

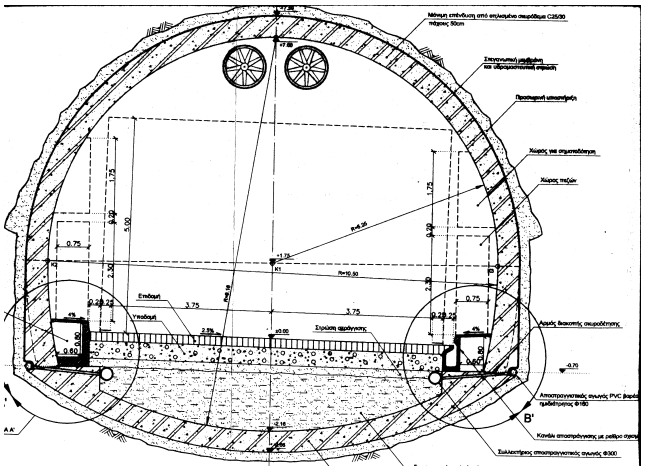
2.2.1 Γενικά

Οι οδικές σήραγγες (*Σχήμα 2-3*) είναι τμήματα χαράξεων, με ιδιαίτερες απαιτήσεις όσον αφορά στην ασφάλεια κυκλοφορίας, έχουν υψηλό κόστος κατασκευής, συντήρησης και λειτουργίας, και γι' αυτό πρέπει να μελετώνται με ιδιαίτερη προσοχή και επιμέλεια.

Γενικά ο γεωμετρικός σχεδιασμός οδού είναι αντικείμενο του μελετητή οδοποιίας σε συνεργασία με τους μελετητές των άλλων κατηγοριών του μελετητικού σχήματος. Το παρεχόμενο επίπεδο ασφαλείας σε μια σήραγγα είναι συνάρτηση πλήθους παραγόντων οι κυριότεροι εκ των οποίων είναι: ο χρήστης, ο γεωμετρικός - λειτουργικός σχεδιασμός, η δομική διάρθρωση και συντήρηση, και η συμμετοχή βαρέων οχημάτων στην κυκλοφορία. Σε κάθε περίπτωση, η ασφάλεια, η οποία αποτελεί άλλωστε και τον κυρίαρχο στόχο, κατά τη διαδικασία σχεδιασμού και λειτουργίας μιας σήραγγας, διαχωρίζεται στην *πρόληψη*, η οποία αφορά στην αποφυγή κρίσιμων καταστάσεων και στην *ελαχιστοποίηση συνεπειών* σε περίπτωση αστοχίας. Στα εδάφια που έπονται, αναλύονται οι μεταβλητές που αφορούν την πρώτη περίπτωση ενώ οι ενέργειες, οι οποίες συνιστούν τη δεύτερη περίπτωση εντάσσονται σε ένα γενικότερο σχεδιασμό.



(α) Σήραγγα Αρτεμισίου



(β) Σήραγγα Κνημίδας, του ΠΑΘΕ

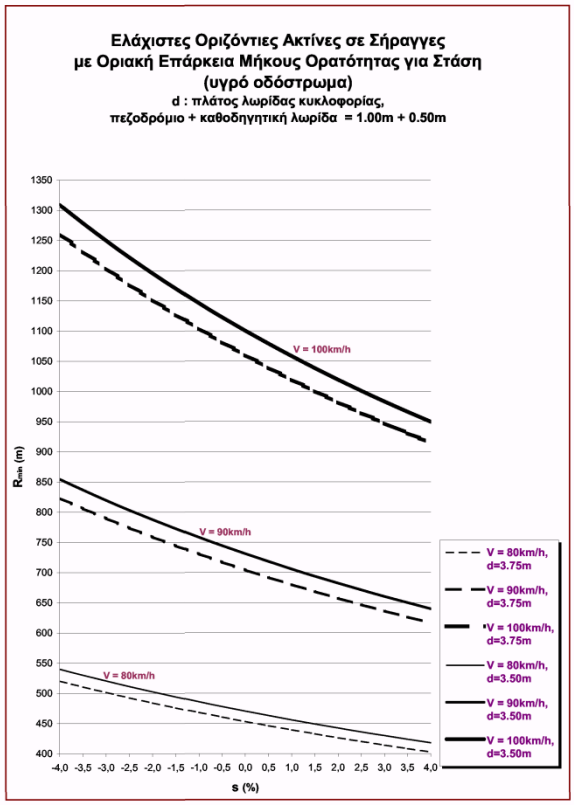
Σχήμα 2-3. Τυπικές οδικές σήραγγες

2.2.2 Γεωμετρική Θεώρηση

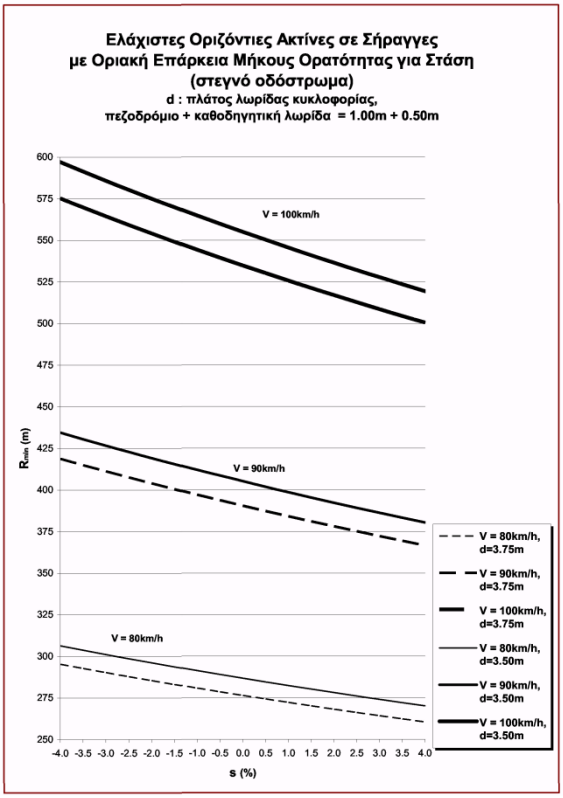
Η μελέτη χάραξης των οδικών τμημάτων σε σήραγγα εκπονείται στην Ελλάδα σύμφωνα με τις Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων (ΟΜΟΕ-Χ, 2001). Η επιτρεπόμενη ταχύτητα μέσα στη σήραγγα συναρτάται με τη μέγιστη καμπυλότητά της. Διεθνώς, ο καθορισμός των ορίων ταχύτητας, που κυμαίνεται γενικά από 80 έως 100 km/h (δύναται να εκτείνεται από 60 έως 120 km/h), λαμβάνει υπόψη και το πλάτος των λωρίδων κυκλοφορίας που διαφέρει από 3.25 έως 3.75 m από χώρα σε χώρα, και τη διέλευση σημαντικού αριθμού βαριών οχημάτων· η ακτίνα καμπυλότητας δεν πρέπει να είναι μικρότερη από 550·÷ 600m (PIARC, -). Στην Ελλάδα, για τον καθορισμό του ορίου ταχύτητας λαμβάνονται υπόψη τα διατιθέμενα Μήκη Ορατότητας για Στάση (ΜΟΣ), τα οποία συνδέονται με τις ακτίνες καμπυλότητας της χάραξης. Για τον υπολογισμό δε του διατιθέμενου μήκους ορατότητας ο χρόνος αντίληψης - αντίδρασης λαμβάνεται ίσος με 2sec. Επειδή αναμένονται μεγάλες διαφορές μεταξύ των τιμών των λειτουργικών ταχυτήτων (ΔV_{85} > 10km/h) στα οδικά τμήματα που προηγούνται ή έπονται της σήραγγας και του τμήματος σε σήραγγα, και οι οποίες επιφέρουν σημαντική αύξηση της επικινδυνότητας του οδικού τμήματος στις εισόδους των σηράγγων, πρέπει να εξετάζεται η ομοιομορφία και η συνέχεια των λειτουργικών ταχυτήτων ακόμη και στους

αυτοκινητόδρομους. Η σταδιακή μείωση των επιπέδων της λειτουργικής ταχύτητας μέχρι του επιθυμητού επιτυγχάνεται είτε με την προσαρμογή της χάραξης, που αποτελεί τον καλύτερο και πιο αξιόπιστο τρόπο αντιμετώπισης και ταυτόχρονα υπό προϋποθέσεις μπορεί να συμβάλλει στην μείωση του κόστους του έργου είτε με την εφαρμογή συστήματος ειδικής σήμανσης, ιδιαίτερα έντονης και εμφανούς στον οδηγό (γέφυρες σήμανσης, VMS κλπ), η οποία θα καθοδηγεί αξιόπιστα τους οδηγούς στην επιλογή της κατάλληλης ταχύτητας κίνησης, η οποία μπορεί και να παρακολουθείται και να ελέγχεται.

Στο Σχήμα 2-4α δίδονται οι προτεινόμενες ελάχιστες οριζόντιες ακτίνες σε συνάρτηση με το διατιθέμενο μήκος ορατότητας για στάση οι οποίες αναφέρονται στα στόμια των σηράγγων (υγρό οδόστρωμα). Οι αντίστοιχες οριζόντιες ακτίνες που αφορούν στεγνό οδόστρωμα, αναφέρονται στο εσωτερικό της σήραγγας και δίδονται στο Σχήμα 2-4β. Στην τελευταία περίπτωση, η τιμή του διαμήκους συντελεστή πρόσφυσης με ακινητοποιημένους τροχούς ελήφθη 0.60. Κατά την επιλογή της ελάχιστης οριζόντιας ακτίνας σε σήραγγα, ιδιαίτερα στην περίπτωση του στεγνού οδοστρώματος, εξετάζεται και η περίπτωση της ολίσθησης του οχήματος δεδομένου ότι σε ορισμένες περιπτώσεις αυτή η θεώρηση μπορεί να είναι η κρίσιμη.



(α) Υγρό οδόστρωμα



(β) Στεγνό οδόστρωμα, ft=0.60

Σχήμα 2-4. Ελάχιστη οριζόντια ακτίνα ως προς την κατά μήκος κλίση για οριακή επάρκεια ΜΟΣ

Η κατά μήκος κλίση πρέπει να είναι όσο το δυνατό μικρότερη. Σύμφωνα με τον Τ.Ε.Μ., για σήραγγα μίας κατεύθυνσης κυκλοφορίας η μέγιστη κλίση δεν πρέπει να υπερβαίνει το 3%, ενώ για σήραγγα διπλής κυκλοφορίας αυτή δεν πρέπει να υπερβαίνει το 2%. Η επίκλιση δε θα πρέπει να υπερβαίνει το 10 - 12 %. Σύμφωνα με την ΟΜΟΕ/ΤΟΔ (2002), εντός σηράγγων σε οδούς της κατηγορίας Α οι κατά μήκος κλίσεις δεν πρέπει να υπερβαίνουν το 4%. Ιδιαίτερα σε σήραγγες μεγάλου μήκους (> 1km), πρέπει να επιδιώκεται η τιμή της μέγιστης κατά μήκος κλίσης να μην υπερβαίνει το 2.5%. Εντονότερες κατά μήκος κλίσεις έχουν ως μειονέκτημα την υψηλότερη ρύπανση, την μεγαλύτερη πιθανότητα ατυχημάτων, την διασπορά εύφλεκτων υλικών με μεγάλη ταχύτητα και τη μείωση της ταχύτητας των βαρέων οχημάτων. Προκειμένου να μην υποβαθμίζεται το παρεχόμενο επίπεδο εξυπηρέτησης, ιδιαίτερα στις σήραγγες διπλής κατεύθυνσης, όπου απαγορεύεται η προσπέραση, πρέπει να επιδιώκεται η διαφορά ταχυτήτων μεταξύ βαρέων φορτηγών και επιβατηγών οχημάτων να μην υπερβαίνει τα 15km/h. Ο Πίνακας 2-1 δίνει το προτεινόμενο μέγιστο συνιστώμενο μήκος σήραγγας ως συνάρτηση της κατά μήκος κλίσης.

Πίνακας 2-1. Μέγιστο μήκος σήραγγας ως προς την επιρροή της κατά μήκος κλίσης

s [%]	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
ΣΔΚ*[m]	>3000	>3000	>3000	1400	700	500	400	300
ΣΜΚ**[m]	>3000	>3000	>3000	>3000	>3000	>3000	1000	600

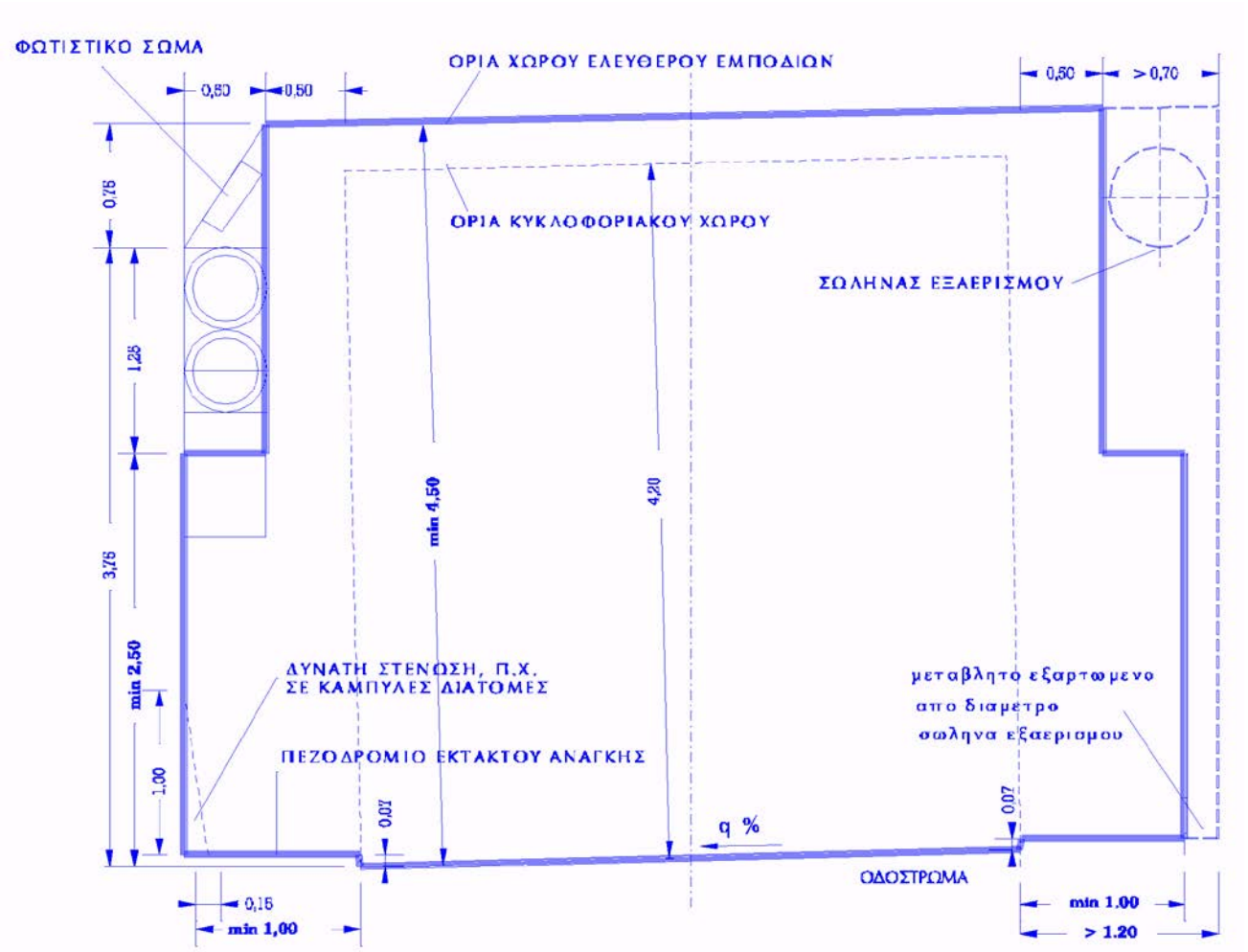
**ΣΔΚ: Σήραγγα Διπλής Κατεύθυνσης, **ΣΜΚ: Σήραγγα Μονής Κατεύθυνσης*

Επισημαίνεται, ότι οι τιμές στον Πίνακα έχουν προκύψει με την θεώρηση, ότι τα οχήματα κινούνται ανεμπόδιστα και δεν λήφθηκαν υπόψη οι μεταβλητές, οι οποίες αφορούν το επίπεδο εξυπηρέτησης της οδού και την οικονομική επιβάρυνση στο σύστημα αερισμού. Με βάση τις τιμές του Πίνακα που αναφέρονται στη Σήραγγα Διπλής Κατεύθυνσης (ΣΔΚ), είναι δυνατός ο κατ' αρχήν προσεγγιστικός προσδιορισμός της κατά μήκος κλίσης σε σχέση με το μήκος της. Αποκλίσεις από τις υπόψη τιμές πρέπει να αιτιολογούνται. Κατά την επιλογή της κατά μήκος κλίσης και του μήκους εφαρμογής της πρέπει να προσδιορίζεται το επίπεδο εξυπηρέτησης και να εκτιμάται η οικονομική επιβάρυνση στο σύστημα αερισμού. Η επιρροή των παραπάνω παραμέτρων πρέπει να αναλύεται σε μια εμπεριστατωμένη τεχνική-οικονομική έκθεση βάσει της οποίας δύναται να απαιτηθεί ελάττωση των προτεινόμενων τιμών του Πίνακα.

2.2.3 Τυπική Διατομή

Οι παράγοντες, που επηρεάζουν την επιλογή της κατάλληλης διατομής μιας σήραγγας είναι ο κυκλοφοριακός φόρτος και η γεωλογία της περιοχής. Εκτός όμως από τα στοιχεία του καταστρώματος μιας σήραγγας, σημαντικό ρόλο παίζουν εν προκειμένω οι διαστάσεις του περιτυπώματος και του πρόσθετου χώρου για τον λειτουργικό εξοπλισμό της σήραγγας. Το περιτύπωμα είναι ο χώρος της διατομής της οδού, στον οποίο δεν πρέπει να υπεισέρχονται σταθερά εμπόδια. Αποτελείται από τον κυκλοφοριακό χώρο, τον άνω και τον πλευρικό χώρο ελευθερίας κινήσεων. Το συνολικό πλάτος του περιτυπώματος προκύπτει από την εκάστοτε διατομή οδού της σήραγγας.

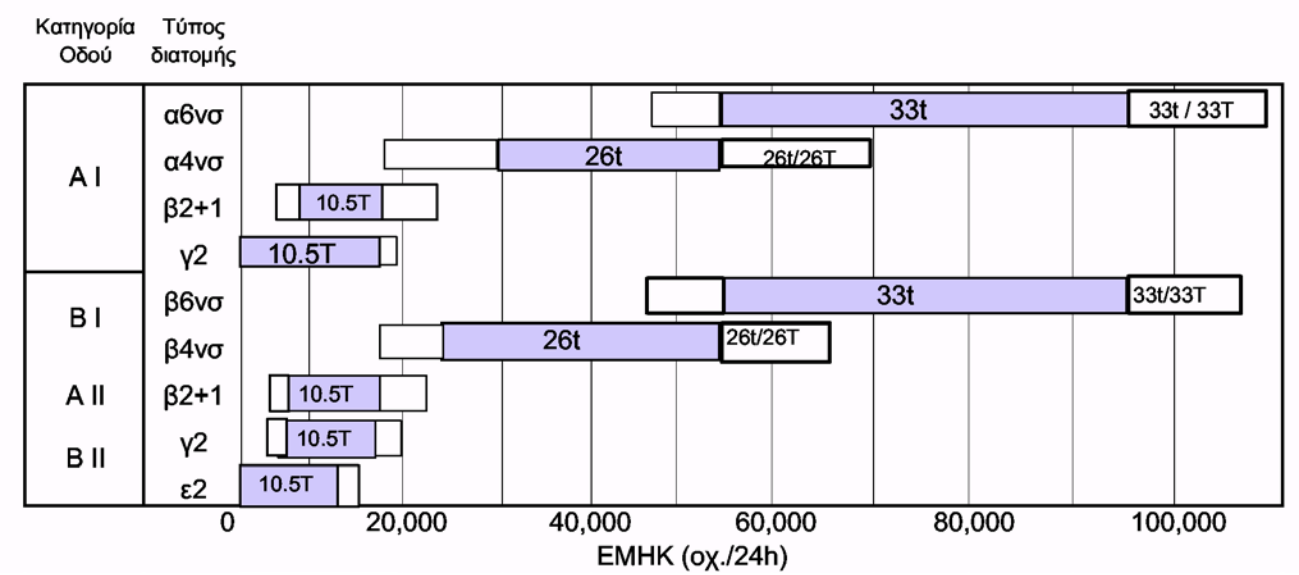
Σε ότι αφορά το καθαρό ύψος οδικών σηράγγων σε ευθυγραμμία, πάνω από το οδόστρωμα, μπορεί να ληφθεί υπόψη η Γ37/1971 εγκύκλιος του Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. η οποία καθορίζει το ελάχιστο ύψος h υπό τις γέφυρες και το οποίο είναι για εθνική οδοποιία h=5m, επαρχιακή οδοποιία h=4.75m και αγροτική οδοποιία h=4.00m. Σημειώνεται ότι ο Τ.Ε.Μ. (TRANS EUROPEAN NORTH SOUTH MOTORWAY) δίνει ελάχιστο ύψος τα 4.75m. Σύμφωνα με τον ΟΜΟΕ/ΤΟΣ (2002) το ελάχιστο απαιτούμενο ελεύθερο ύψος για την μηχανοκίνητη κυκλοφορία ανέρχεται σε 4,50m. Τα πλευρικά όρια του χώρου κυκλοφορίας πρέπει να είναι κάθετα στο οδόστρωμα. Έτσι σε περίπτωση εφαρμογής των μέγιστων τιμών επικλίσεων μπορεί να απαιτηθεί διαπλάτυνση του πλευρικού χώρου ελευθερίας κινήσεων, ώστε σε κάθε περίπτωση να διατίθεται ο αναγκαίος χώρος ελεύθερου εμποδίων. Το απαιτούμενο πλάτος των λωρίδων καθοδήγησης στις ευθυγραμμίες είναι 0.25m. Στις καμπύλες κυμαίνεται από 0.25m έως 0.50m.



Σχήμα 2-5. Τυπικές διαστάσεις περιτυπώματος σήραγγας.

Στο Σχήμα 2-5 δίνονται τα όρια και οι τυπικές διαστάσεις του ελεύθερου εμποδίων χώρου μιας οδού σε σήραγγα. Τα αντικείμενα που παραμορφώνονται εύκολα, όπως οι πινακίδες σήμανσης πρέπει να τοποθετούνται σε απόσταση μεγαλύτερη των 2,50m πάνω από το πεζοδρόμιο της σήραγγας και να απέχουν από τα όρια του κυκλοφοριακού χώρου κατ' ελάχιστο 50cm. Οι απαραίτητοι για τον αερισμό ανεμιστήρες πρέπει να τοποθετούνται σε εσοχές στην οροφή της σήραγγας. Επιτρέπεται η τοποθέτηση των εύκολα παραμορφώσιμων φωτιστικών σωμάτων σε κατακόρυφη απόσταση μεγαλύτερη από 3,75m από το πεζοδρόμιο και έως 50cm από τα όρια του κυκλοφοριακού χώρου. Σε περίπτωση που η διάμετρος των ανεμιστήρων είναι > 70cm, είναι απαραίτητη η διαπλάτυνση των πεζοδρομίων σε συνάρτηση με την διάμετρο των ανεμιστήρων.

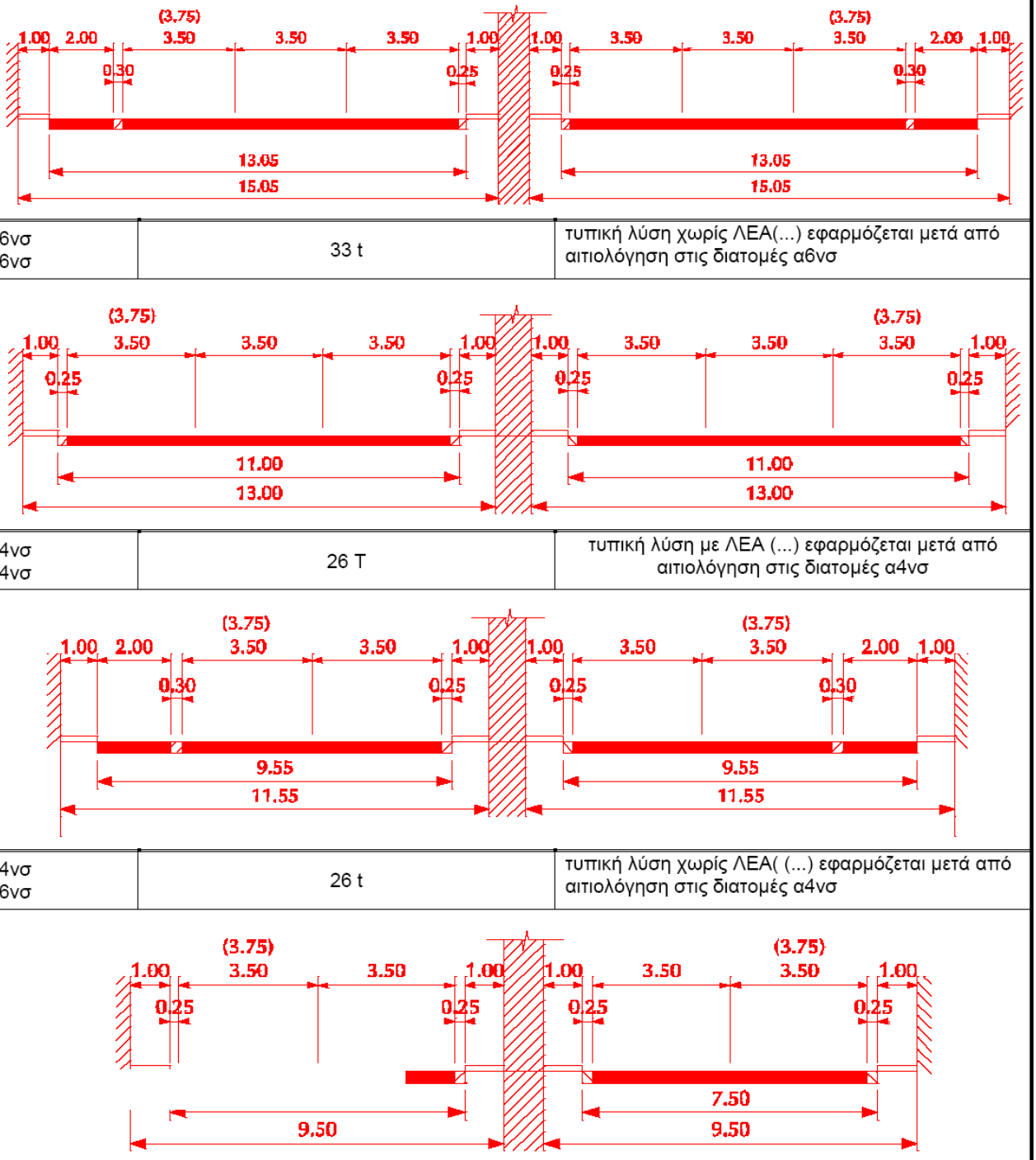
Το πλάτος των σηράγγων εξαρτάται από τον αριθμό λωρίδων κυκλοφορίας. Για τρίϊχνη είναι ~10.0/12.0m, για δίϊχνη ~7.5/9.6m και για μονόϊχνη ~3.0/4.5m, όπου το πρώτο πλάτος αφορά το οδόστρωμα και το δεύτερο το οδόστρωμα με τα πεζοδρόμια. Προκειμένου να καθορισθεί η κατάλληλη διατομή μιας σήραγγας, σύμφωνα με τον ΟΜΟΕ/ΤΟΣ (Σακκάς et al. 2002), απαιτείται η εκπόνηση σχετικής ανάλυσης, στην οποία θα συνδυάζεται η διατομή της οδού σε σήραγγα με την τυπική διατομή του υπόλοιπου τμήματος της οδού με βάση τα προαναφερθέντα αφενός και την οικονομοτεχνική διάσταση του προβλήματος αφετέρου. Κατά τον σχεδιασμό των τμημάτων οδικών σηράγγων χρησιμοποιούνται οι διατομές του υπόλοιπου τμήματος της οδού αλλά με μειωμένες διαστάσεις των επί μέρους στοιχείων της διατομής της οδού και χωρίς σταθεροποιημένο έρεισμα ή λωρίδα εκτάκτου ανάγκης (ΛΕΑ). Στο Σχήμα 2-6 δίδεται η περιοχή εφαρμογής των διατομών οδών σε σήραγγες σε συνάρτηση με τους κυκλοφοριακούς φόρτους.



Σχήμα 2-6. Περιοχή εφαρμογής των διατομών οδών σε σήραγγες σε συνάρτηση με τους κυκλοφοριακούς φόρτους (Σημ. Α Ι: Αυτοκινητόδρομος ή Οδός ταχείας κυκλοφορίας, Α ΙΙ: Οδός μεταξύ νομών / επαρχιών).

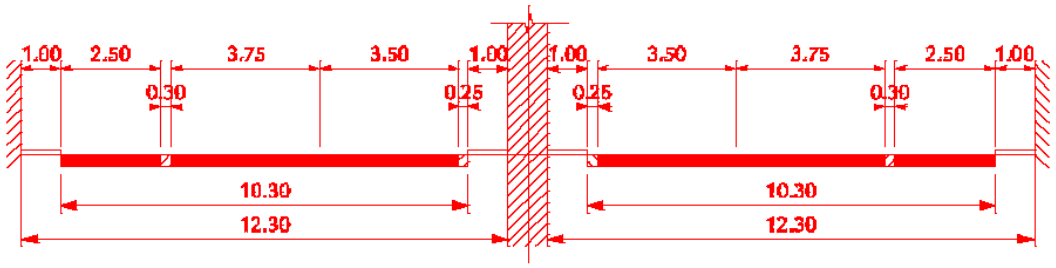
Στο Σχήμα 2-7 και στο Σχήμα 2-8 δίδονται οι τυπικές διατομές οδών σε σήραγγα. Εφ' όσον κριθεί σκόπιμο να εφαρμοσθεί σε σήραγγες διατομή με λωρίδα πολλαπλών χρήσεων, πρέπει για λόγους κόστους το πλάτος της να είναι ίσο με 2,00m (διατομές 26Τ και 33Τ). Η ειδική διατομή 29,5Τ εφαρμόζεται μόνον σε ιδιαίτερες περιπτώσεις με ασυνήθιστα οικονομικό τρόπο κατασκευής και σε σήραγγες πολύ μικρού μήκους. Κατά την διαδικασία επιλογής της κατάλληλης διατομής σε σήραγγα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη: ο τρόπος κατασκευής της σήραγγας, το πλήθος των λωρίδων κυκλοφορίας ανά κατεύθυνση, το προβλεπόμενο μήκος σήραγγας, η μέση κατά μήκος κλίση στην σήραγγα σε ανωφέρεια (0 έως 4%), η μέση συμμετοχή της εμπορευματικής κυκλοφορίας (0 έως 20%) και η Ετήσια Μέση Ημερήσια Κυκλοφορία (ΕΜΗΚ)

ανοικτό τμήμα	αντιστοίχηση	περιγραφή
α6νσ β6νσ	33 T	τυπική λύση με ΛΕΑ(...) εφαρμόζεται μετά από αιτιολόγηση στις διατομές α6νσ
α6νσ β6νσ	33 t	τυπική λύση χωρίς ΛΕΑ(...) εφαρμόζεται μετά από αιτιολόγηση στις διατομές α6νσ
α4νσ β4νσ	26 T	τυπική λύση με ΛΕΑ (...) εφαρμόζεται μετά από αιτιολόγηση στις διατομές α4νσ
α4νσ β6νσ	26 t	τυπική λύση χωρίς ΛΕΑ((...) εφαρμόζεται μετά από αιτιολόγηση στις διατομές α4νσ

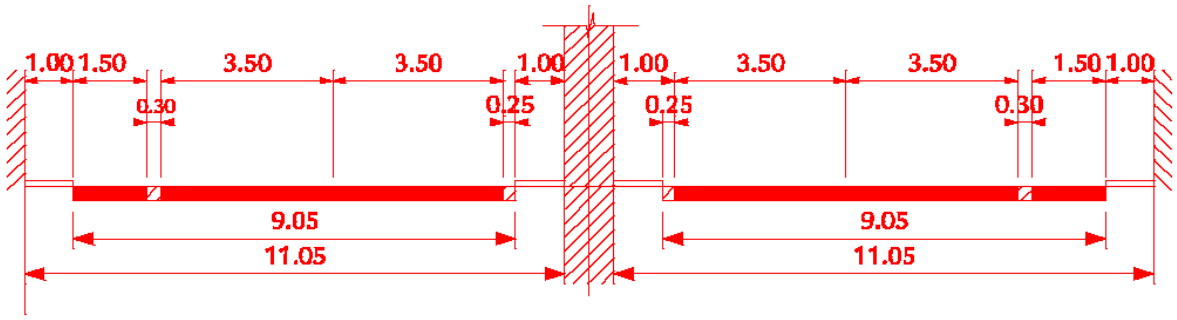


Σχήμα 2-7. Τυπικές διατομές σε σήραγγα (α)

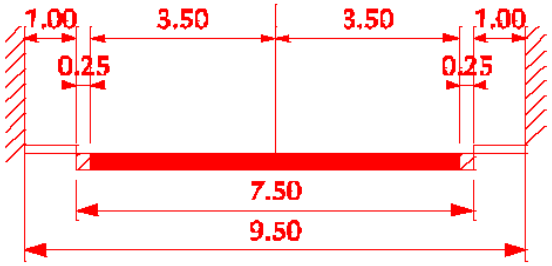
ανοικτό τμήμα	αντιστοίχηση	περιγραφή
α4νσ	29.5 T	λύση προτεινόμενη σε εξαιρετικές περιπτώσεις



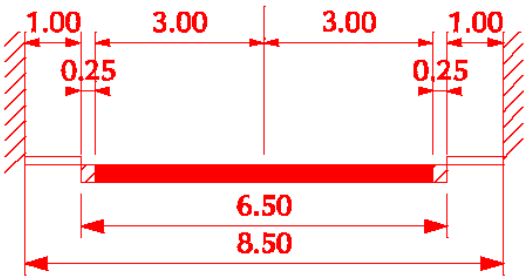
β4νσ	26 Tr	λύση εναλλακτική της 26T συνιστώμενη σε εξαιρετικές περιπτώσεις



β2+1 γ2	10.5 T	τυπική λύση



ε2	10.0 T	τυπική λύση



Σχήμα 2-8. Τυπικές διατομές σε σήραγγα (β).

2.2.4 Λοιπά Στοιχεία Σηράγγων

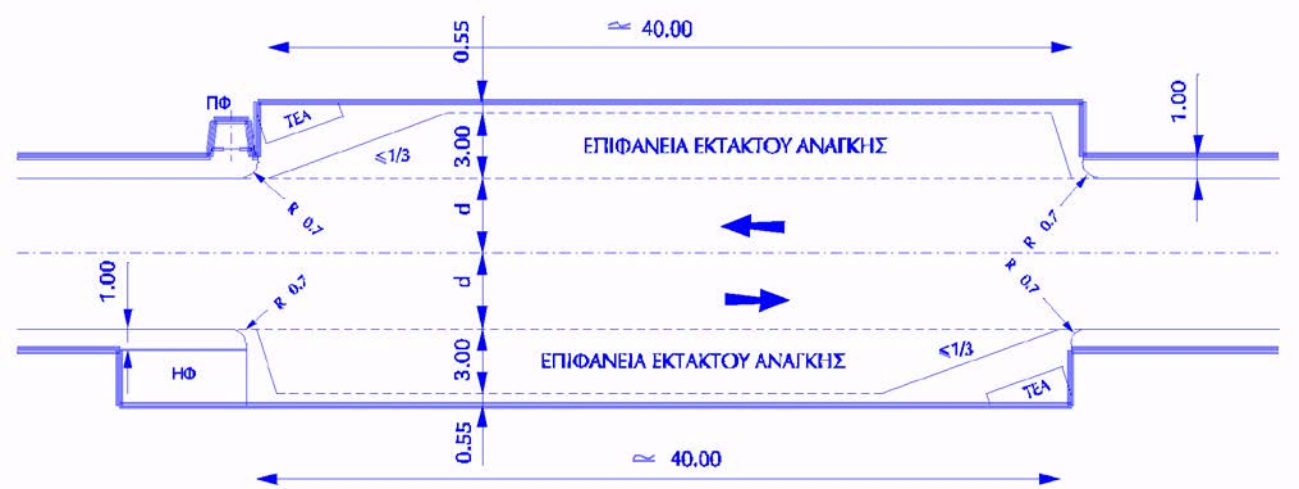
Για λόγους ασφάλειας της κυκλοφορίας στην σήραγγα ενδείκνυνται ειδικά κατασκευαστικά στοιχεία, όπως λωρίδες πολλαπλών χρήσεων, εσοχές έκτακτης στάθμευσης, έξοδοι διαφυγής, πεζοδρόμια, και έλεγχοι ύψους οχημάτων.

Η εφαρμογή ή όχι λωρίδας πολλαπλών χρήσεων προκύπτει από τεχνικοοικονομική ανάλυση σε συνάρτηση με τους κυκλοφοριακούς φόρτους, το μήκος της σήραγγας και τον τρόπο κατασκευής της.

Οι εσοχές έκτακτης στάθμευσης προβλέπονται, όταν για λόγους οικονομίας δεν κατασκευάζονται λωρίδες πολλαπλών χρήσεων. Είναι απαραίτητες όταν το μήκος της σήραγγας υπερβαίνει τα 1050m. Οι εσοχές αυτές πρέπει να απέχουν μεταξύ τους από 700m έως 1100m περίπου. Σε σήραγγες διπλής κατεύθυνσης, οι εσοχές έκτακτης στάθμευσης πρέπει να διατάσσονται κατά το δυνατόν αντικριστά η μία στην άλλη, ώστε να είναι δυνατή η αναστροφή οχημάτων. Επιβάλλεται η σήμανση τους καθώς και η ύπαρξη τηλεφώνου και πυροσβεστικού κρουνού. Στο Σχήμα 2-9 και στο Σχήμα 2-10 απεικονίζονται οι τυπικές διαμορφώσεις μονόπλευρης και αμφίπλευρης αντίστοιχα εσοχής έκτακτης στάθμευσης.



Σχήμα 2-9. Τυπικές διαμορφώσεις μονόπλευρης εσοχής έκτακτης στάθμευσης. Υπόμνημα (ενδεικτικές θέσεις): ΠΦ : Πυροσβεστική Φωλεά, ΗΦ: Η/Μ Φωλεά, ΤΕΑ : Τηλέφωνο Εκτάκτου Ανάγκης

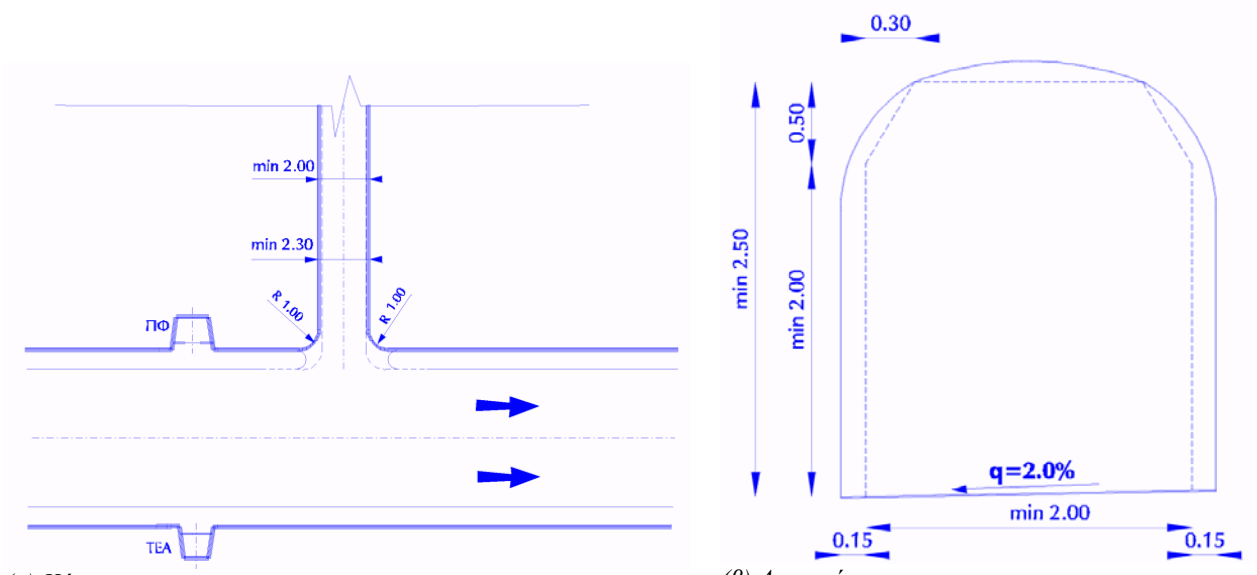


Σχήμα 2-10. Τυπικές διαμορφώσεις αμφίπλευρης εσοχής έκτακτης στάθμευσης. Υπόμνημα (ενδεικτικές θέσεις): ΠΦ : Πυροσβεστική Φωλεά, ΗΦ : Η/Μ Φωλεά, ΤΕΑ : Τηλέφωνο Εκτάκτου Ανάγκης

Σε σήραγγες, των οποίων το μήκος υπερβαίνει τα 700m, πρέπει να διατάσσονται εγκάρσιες έξοδοι διαφυγής περίπου ανά 350m, εφόσον το σύστημα εξαερισμού της σήραγγας σε περίπτωση πυρκαγιάς δεν παρέχει επαρκή ασφάλεια. Επιβάλλεται η σήμανση τους ανά 50m σε ύψος 1.0m - 1.5m από το πεζοδρόμιο με ένδειξη της απόστασης. Σε σήραγγες διπλού κλάδου οι εγκάρσιες έξοδοι διαφυγής οδηγούν κατά κανόνα από την μία σήραγγα στην άλλη. Στις μονές σήραγγες διπλής κατεύθυνσης, εφόσον δεν είναι δυνατή η επικοινωνία των εγκάρσιων σηράγγων διαφυγής με τον εξωτερικό χώρο πρέπει να προβλέπεται διαμήκης σήραγγα διαφυγής, με

την οποία θα συνδέονται οι αντίστοιχες εγκάρσιες. Σε εξαιρετικές περιπτώσεις μπορεί να προτείνονται και άλλοι τρόποι διαφυγής.

Οι εγκάρσιες έξοδοι διαφυγής πρέπει να κλείνουν με θύρες που να τοποθετούνται σε απόσταση περίπου 3.0m από την οριογραμμή της σήραγγας. Η περιοχή των θυρών πρέπει να διαμορφώνεται με μηδενική κατά μήκος κλίση και επίκλιση. Στο Σχήμα 2-11 απεικονίζεται η τυπική διαμόρφωση μιας εγκάρσιας εξόδου διαφυγής πεζών, με τις διαστάσεις και τα όρια του περιτυπώματος. Η ελάχιστη κατά μήκος κλίση μιας εγκάρσιας εξόδου διαφυγής πεζών ανέρχεται σε 0.5% και η μέγιστη σε 10,0%. Η μηκοτομή της πρέπει να διαμορφώνεται κατά το δυνατόν με κυρτή κατακόρυφη καμπύλη. Το οδόστρωμα πρέπει να διαμορφώνεται μονοκλινές με τιμή επίκλισης ίση με 2.0%.

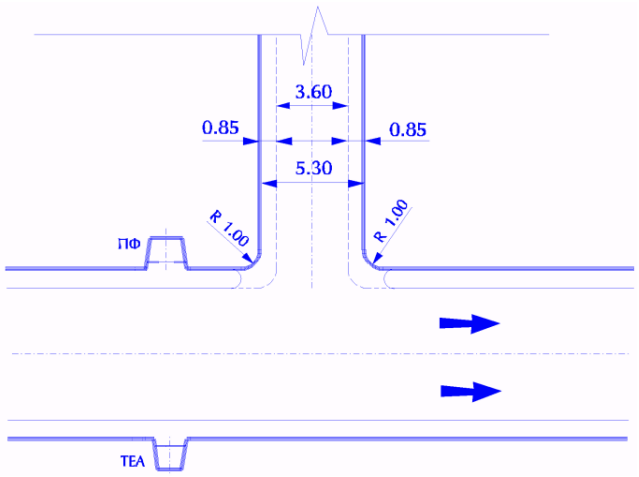


(α) Κάτοψη *(β) Διατομή*

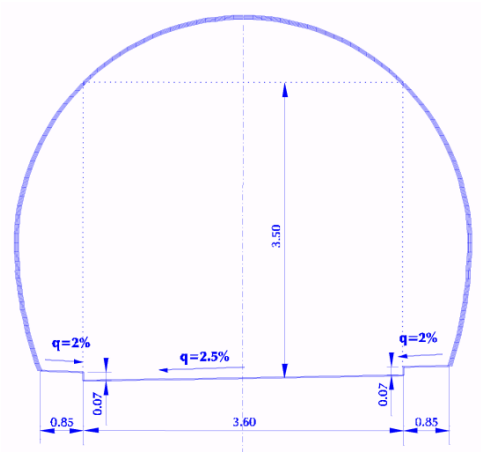
Σχήμα 2-11. Τυπική διαμόρφωση εξόδου διαφυγής πεζών (κάτοψη). Υπόμνημα (ενδεικτικές θέσεις): ΠΦ: Πυροσβεστική Φωλεά, ΤΕΑ : Τηλέφωνο Εκτάκτου Ανάγκης

Οι εγκάρσιες έξοδοι διαφυγής ανά τρεις πρέπει να διαμορφώνονται έτσι, ώστε να είναι δυνατή η προσέγγιση οχημάτων έκτακτης ανάγκης, όπως πυροσβεστικά οχήματα και ασθενοφόρα. Στο Σχήμα 2-12 απεικονίζεται η τυπική διαμόρφωση σήραγγας προσέγγισης οχημάτων εκτάκτου ανάγκης. Στις υπόψη εξόδους, η επικοινωνία μεταξύ κλάδων σηράγγων θα περιλαμβάνει ξεχωριστές θύρες για την πρόσβαση οχημάτων εκτάκτου ανάγκης και διαφυγής προσώπων αντίστοιχα. Η χωροθέτησή τους θα πρέπει κατά το δυνατόν να συνδυάζεται με τις εσοχές στάθμευσης εκτάκτου ανάγκης για λόγους διευκόλυνσης των ελιγμών εκτός και αν υπάρχουν βάσιμοι λόγοι οι οποίοι να απαγορεύουν κάτι τέτοιο. Η κατά μήκος κλίση και η μηκοτομή τους θα πρέπει να διαμορφώνεται όπως και στις εγκάρσιες εξόδους διαφυγής πεζών. Πρέπει δε να προβλέπονται αποχετευτικά ρείθρα. Το οδόστρωμα πρέπει να διαμορφώνεται μονοκλινές με τιμή επίκλισης ίση με 2.5%. Οι εγκάρσιες έξοδοι διαφυγής οχημάτων εκτάκτου ανάγκης - οχημάτων πρέπει να κλείνουν με θύρα η οποία θα τοποθετείται σε απόσταση περίπου 4.50m από την οριογραμμή της σήραγγας. Η περιοχή των θυρών πρέπει να διαμορφώνονται με μηδενική κατά μήκος κλίση και επίκλιση.

Στις σήραγγες με ιδιαίτερα μεγάλο μήκος (> 6km) και περί το μέσον αυτών, πρέπει να διατάσσεται εσοχή αναστροφής για οχήματα μεγάλου μήκους. Οι διαστάσεις και τα όρια του περιτυπώματος των εγκάρσιων εξόδων διαφυγής οχημάτων εκτάκτου ανάγκης και για οχήματα δίδονται στο Σχήμα 2-12. Τέλος στο Σχήμα 2-13 απεικονίζεται συνδυασμός εγκάρσιας εξόδου διαφυγής οχημάτων και εσοχών στάθμευσης εκτάκτου ανάγκης σε δίδυμες σήραγγες.

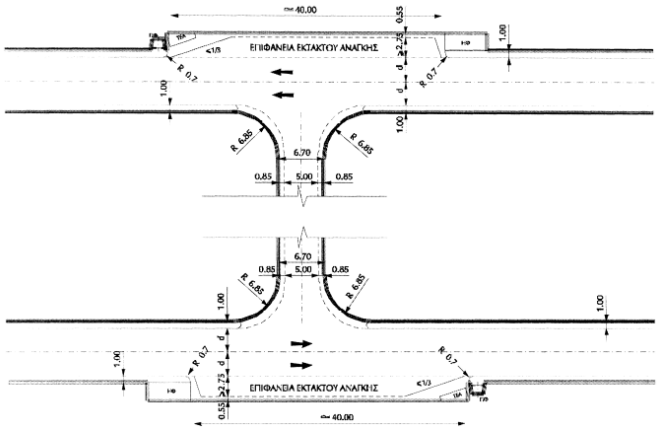


(α) Κάτοψη

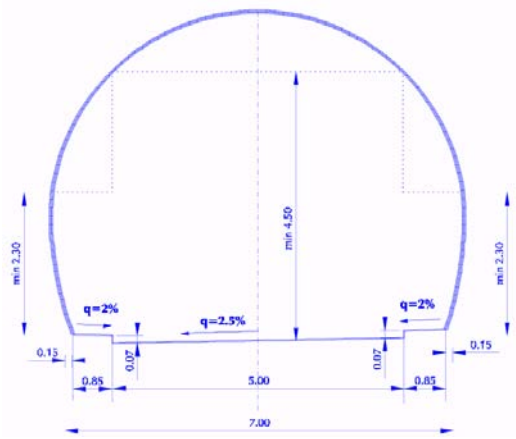


(β) Διατομή

Σχήμα 2-12. Τυπική διαμόρφωση σήραγγας προσέγγισης οχημάτων εκτάκτου ανάγκης. Υπόμνημα (ενδεικτικές θέσεις): ΠΦ : Πυροσβεστική Φωλεά, ΤΕΑ : Τηλέφωνο Εκτάκτου Ανάγκης



(α) Κάτοψη εποχούμενης εγκάρσιας σήραγγας



(β) Διατομή

Σχήμα 2-13. Έξοδοι διαφυγής οχημάτων

Και στις δύο πλευρές του οδοστρώματος πρέπει να διατάσσονται πεζοδρόμια για περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης πλάτους τουλάχιστον 1.00m. Τα κράσπεδα πρέπει να έχουν ύψος 7 cm. Στις περιπτώσεις απαίτησης κυκλοφορίας πεζών στη σήραγγα (πχ. αστική σήραγγα), υπό κανονικές συνθήκες πρέπει να εξετασθεί η περίπτωση χωροθέτησης ξεχωριστού στομίου. Αν αυτό δεν είναι δυνατόν απαιτείται η τοποθέτηση κιγκλιδώματος και η ύψωση του πεζοδρομίου τουλάχιστον κατά 0.50m από την επιφάνεια κυκλοφορίας, ενώ και στην περίπτωση αυτή ως ελάχιστο πλάτος πεζοδρομίου ορίζεται αυτό με πλάτος 1.00m. Επισημαίνεται ότι στην περίπτωση αυτή απαιτείται αντίστοιχη προσαρμογή στα γεωμετρικά στοιχεία.

Πριν την είσοδο σε μία σήραγγα είναι σκόπιμη η εγκατάσταση συστημάτων ελέγχου του ύψους των οχημάτων. Τα συστήματα ελέγχου του ύψους των οχημάτων πρέπει να τοποθετούνται έτσι, ώστε να είναι δυνατή η ακινητοποίηση ενός υψηλού οχήματος. Πρέπει δε προς τούτο το όχημα να είναι δυνατόν να σταματήσει σε παρακείμενη επιφάνεια πριν την σήραγγα ή να εισέλθει σε άλλη οδό πριν την είσοδο στην σήραγγα.

2.2.5 Εσοχές

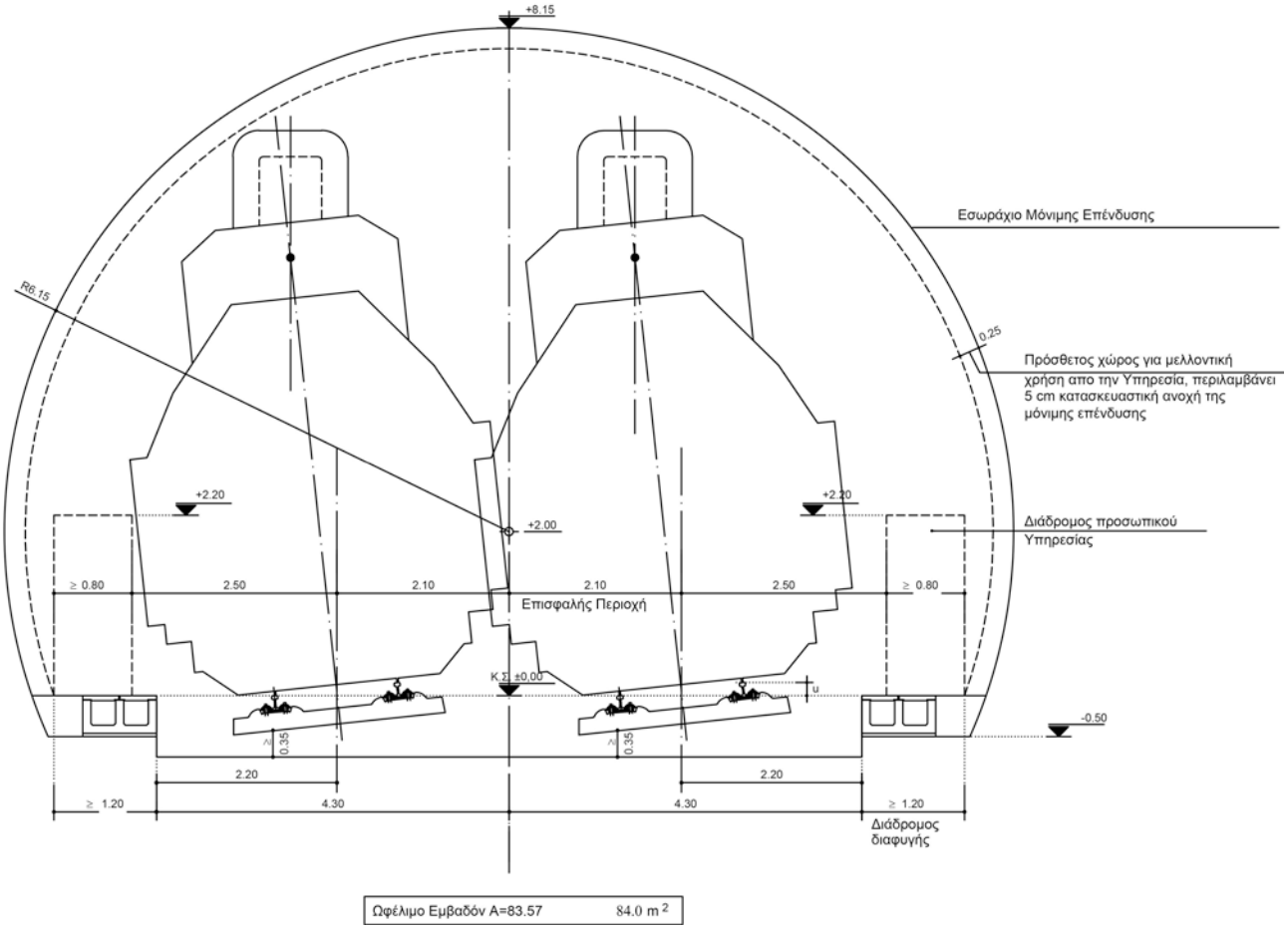
Κατά μήκος της σήραγγας, ανά τακτά διαστήματα διαμορφώνονται τυπικές εσοχές για την τοποθέτηση πυροσβεστικών μέσων (πυροσβεστικές φωλεές - ΠΦ), φρεατίων ελέγχου αποστράγγισης (ΦΕΑ), ηλεκτρομηχανολογικών πινάκων (εσοχές αναγκών σήραγγας - ΕΑΣ), και τηλεφώνων εκτάκτου ανάγκης (ΤΕΑ).

2.2.6 Κυκλοφοριακοί Περιορισμοί

Οι κυριότεροι κυκλοφοριακοί περιορισμοί που επιβάλλονται κατά την κίνηση οχημάτων σε σήραγγες είναι: η απαγόρευση της προσπέρασης σε σήραγγες διπλής κατεύθυνσης, η απαγόρευση της αναστροφής στην κατεύθυνση κίνησης των οχημάτων εκτός και αν παραστεί έκτακτη ανάγκη (π.χ. πυρκαγιά) και αφού προηγουμένως ζητηθεί ο υπόψη ελιγμός μέσω του προσωπικού συντήρησης της σήραγγας, η απαγόρευση της στάσης με εξαίρεση την περίπτωση εκτάκτου περιστατικού, και η υποχρέωση για άναμμα των φώτων πορείας.

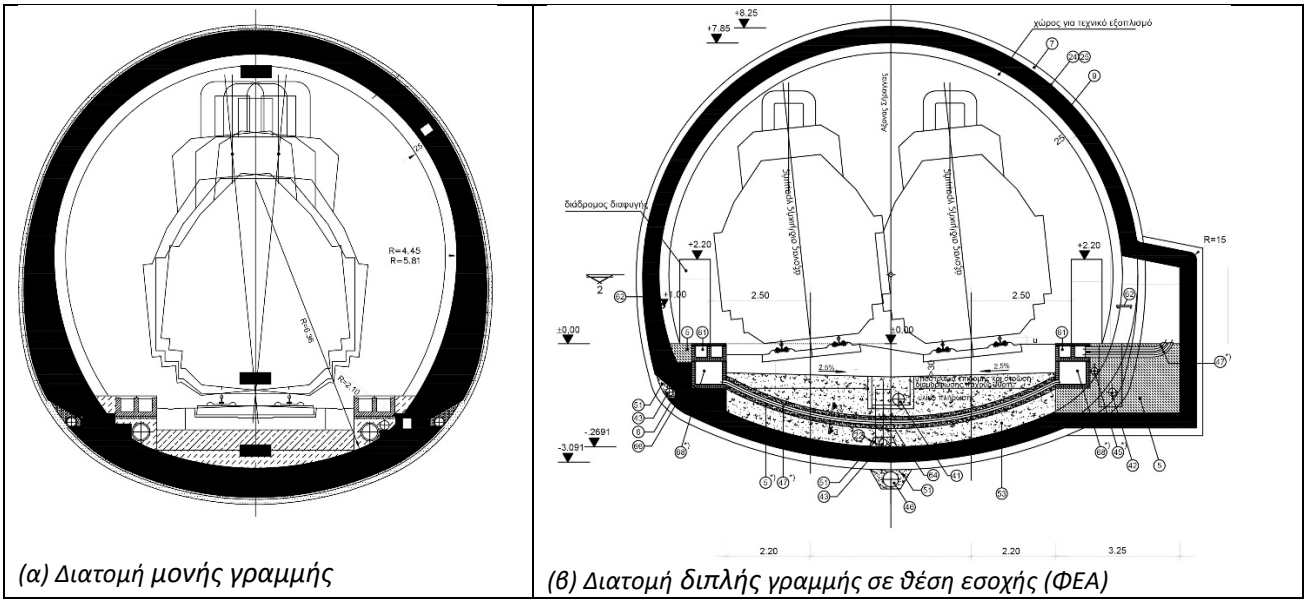
2.3 Γεωμετρία σιδηροδρομικών σηράγγων

Στις ΗΠΑ, στις ευθύγραμμες σιδηροδρομικές σήραγγες για τον καθορισμό της διατομής χρήσης εφαρμόζονται οι κανονισμοί των σιδηροδρομικών γεφυρών (King & Kuesel, 1996) όπως π.χ. οι AREA . Το ύψος τους πάνω από την τροχιά θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 6.7 m. Το πλάτος τους για μονής τροχιάς σήραγγες είναι τουλάχιστον 4.9 m, για δε διπλής 8.9 m. Οι κλίσεις δεν θα πρέπει να υπερβαίνουν το 75 % της κλίσης της υπόλοιπης χάραξης.



Σχήμα 2-14. Ανοιχτή διατομή χρήσης και περιτύπωμα συρμού σιδηροδρομικής σήραγγας διπλής γραμμής της ΕΡΓΟΣΕ ΑΕ, για ταχύτητες 160-200km/h.

Στην Ελλάδα, η ΕΡΓΟΣΕ ΑΕ ακολουθεί γενικά τις προδιαγραφές των γερμανικών σιδηροδρόμων (Ril 853, 2002), με τις απαιτούμενες προσαρμογές. Οι γερμανικές προδιαγραφές (Maidl, 2004) διακρίνουν τέσσερις κατηγορίες ταχύτητας συρμών, ήτοι 230-300 km/h, 160-230 km/h, <160 km/h, <120km/h. Η διατομή χρήσης σιδηροδρομικής σήραγγας διπλής κατεύθυνσης για υψηλές ταχύτητες δίνεται στο ***Σχήμα 2-14***. Στο ***Σχήμα 2-15*** δίνονται αντίστοιχα οι διατομές εκσκαφής και χρήσης για σήραγγες κλειστής διατομής, μονής και διπλής κατεύθυνσης.

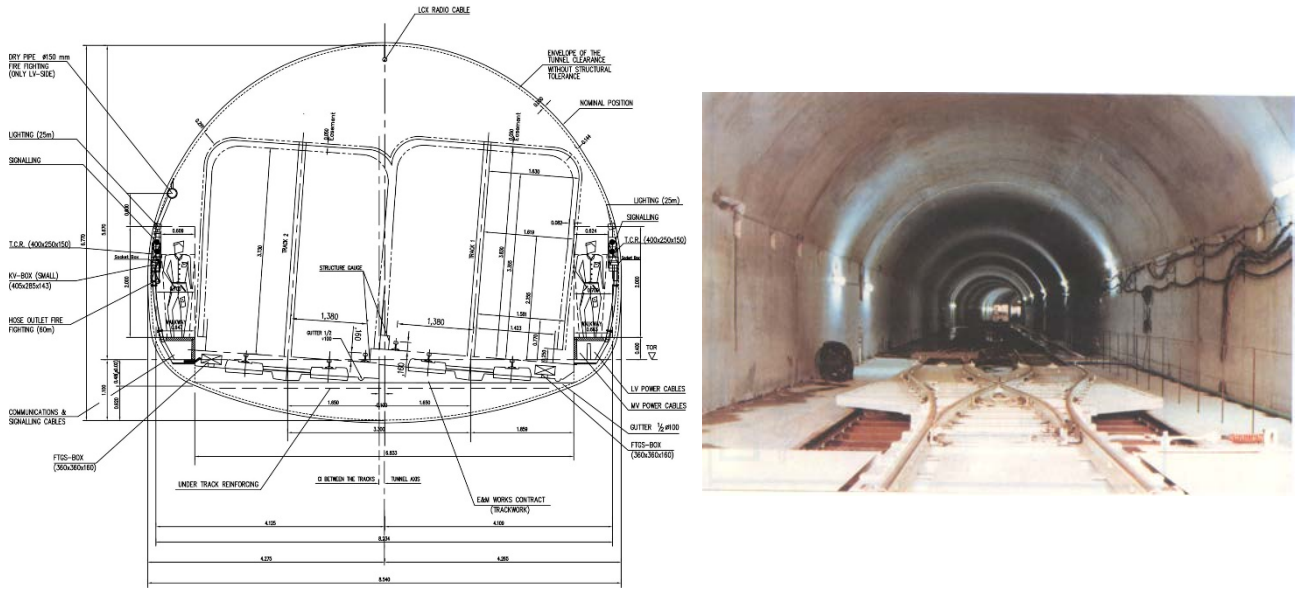


(α) Διατομή μονής γραμμής *(β) Διατομή διπλής γραμμής σε θέση εσοχής (ΦΕΑ)*

Σχήμα 2-15. Κλειστές διατομές και περιτύπωμα συρμών σιδηροδρομικών σηράγγων της ΕΡΓΟΣΕ ΑΕ για ταχύτητες 160-200km/h

2.4 Γεωμετρία σηράγγων μετρό

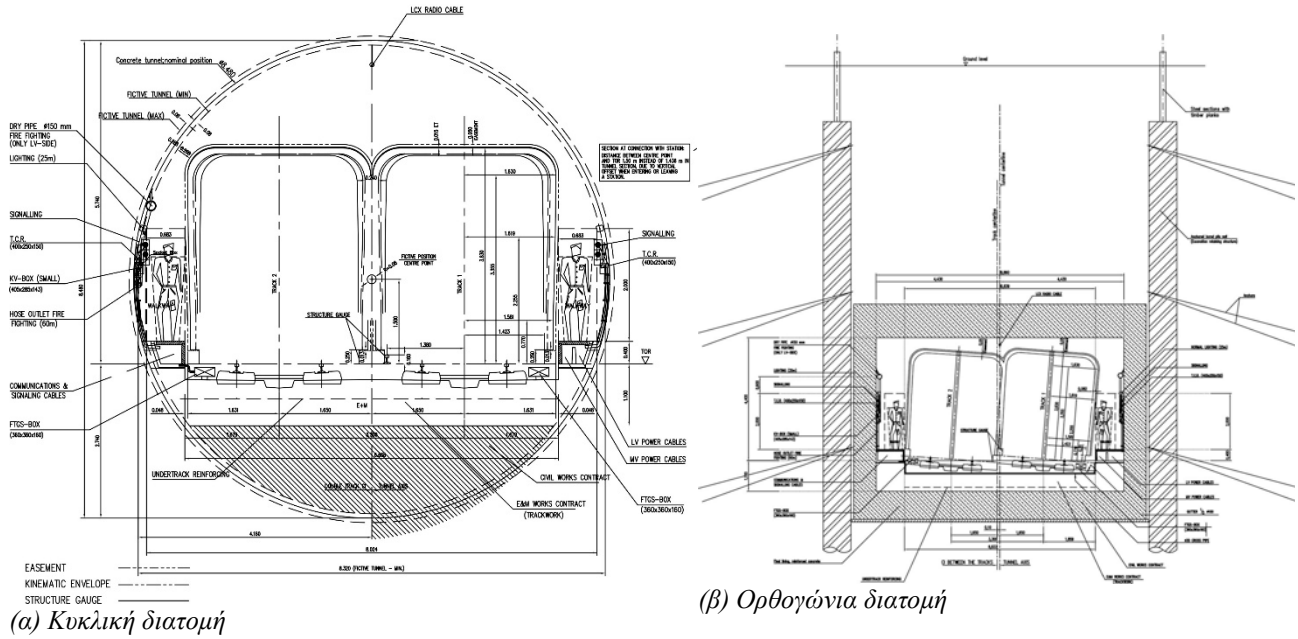
Για σήραγγες αστικού σιδηροδρόμου κάθε υπεύθυνος φορέας ακολουθεί δικές του προδιαγραφές διατομής και χάραξης. Γενικά οι ακτίνες καμπυλότητας είναι τουλάχιστον 1100 m (>350m στο Μετρό της Αθήνας), οι δε κλίσεις δεν υπερβαίνουν το 3% (επιθυμητό όριο 1.5% και οριακό 4% στο Μετρό της Αθήνας), αλλά και δεν υπολείπονται του 0.5% προκειμένου να επιτυγχάνεται διαμήκης στράγγιση. Οι σήραγγες γραμμής μετρό δύνανται να είναι είτε διπλής τροχιάς, όπως π.χ. στην περίπτωση του Μετρό της Αθήνας είτε δίδυμες μονής τροχιάς όπως π.χ. στην περίπτωση του Μετρό της Θεσσαλονίκης. Στο *Σχήμα **2-16*** φαίνεται το εσωράχιο σήραγγας του Μετρό της Αθήνας με εντός αυτού σχεδιασμένο το περιτύπωμα δύο συρμών, με εύρος κάθε τροχιάς 1435mm, και των πεζοδρομίων. Διατομές τέτοιας μορφής επιλέγονται εφόσον η διάνοιξη πραγματοποιηθεί με συμβατικές μεθόδους.



(α) Εσωράχιο, τεσσάρων τόξων, με εντός αυτού το περιτύπωμα *(β) Τμήμα: Αττική-Λάρισα*

Σχήμα 2-16. Σήραγγα του Μετρό της Αθήνας, διανοιγμένη συμβατικά

Στο Σχήμα 2-17, αριστερά, δίνεται το εσωράχιο διατομής σήραγγας του Μετρό της Αθήνας, κυκλικού σχήματος, με εντός αυτού το περιτύπωμα των συρμών και των πεζοδρομίων. Διατομές αυτής της μορφής επιλέγονται εφόσον η διάνοιξη πραγματοποιείται από μηχανές ολομέτωπης κοπής. Στο ίδιο σχήμα, δεξιά, δίνεται το εσωράχιο διατομής σήραγγας του Μετρό της Αθήνας, ορθογώνιου σχήματος, με εντός αυτού το περιτύπωμα των συρμών και των πεζοδρομίων. Διατομές αυτής της μορφής επιλέγονται όταν εφαρμόζεται η μέθοδος της ανοικτής εκσκαφής. Το βάθος εκσκαφής των σηράγγων μετρό είναι γενικά μικρό. Στην περίπτωση του μετρό της Αθήνας αυτό κυμαίνεται γενικά μεταξύ 6 και 28m, απόσταση που είναι αρκετά κάτω από τα αρχαιολογικά ευρήματα και τις εγκαταστάσεις των δικτύων οργανισμών κοινής ωφέλειας.

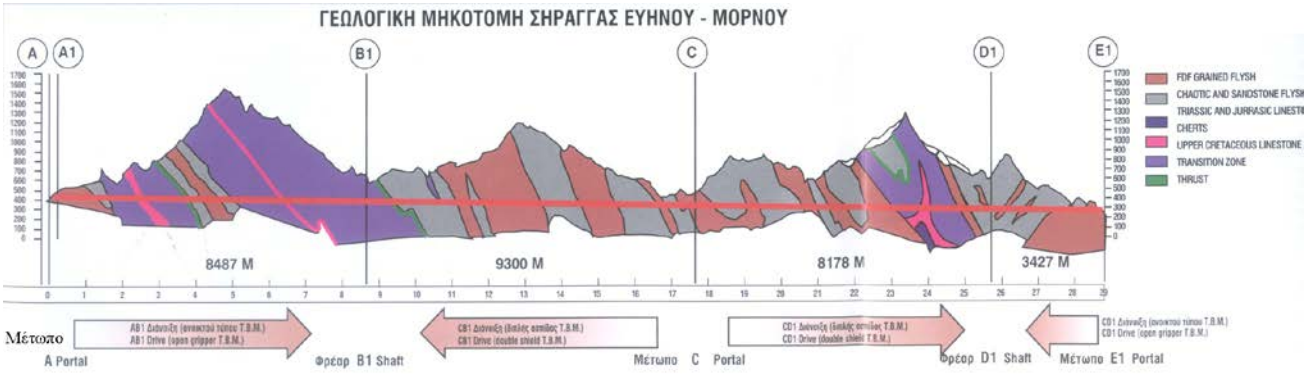


(α) Κυκλική διατομή *(β) Ορθογώνια διατομή*

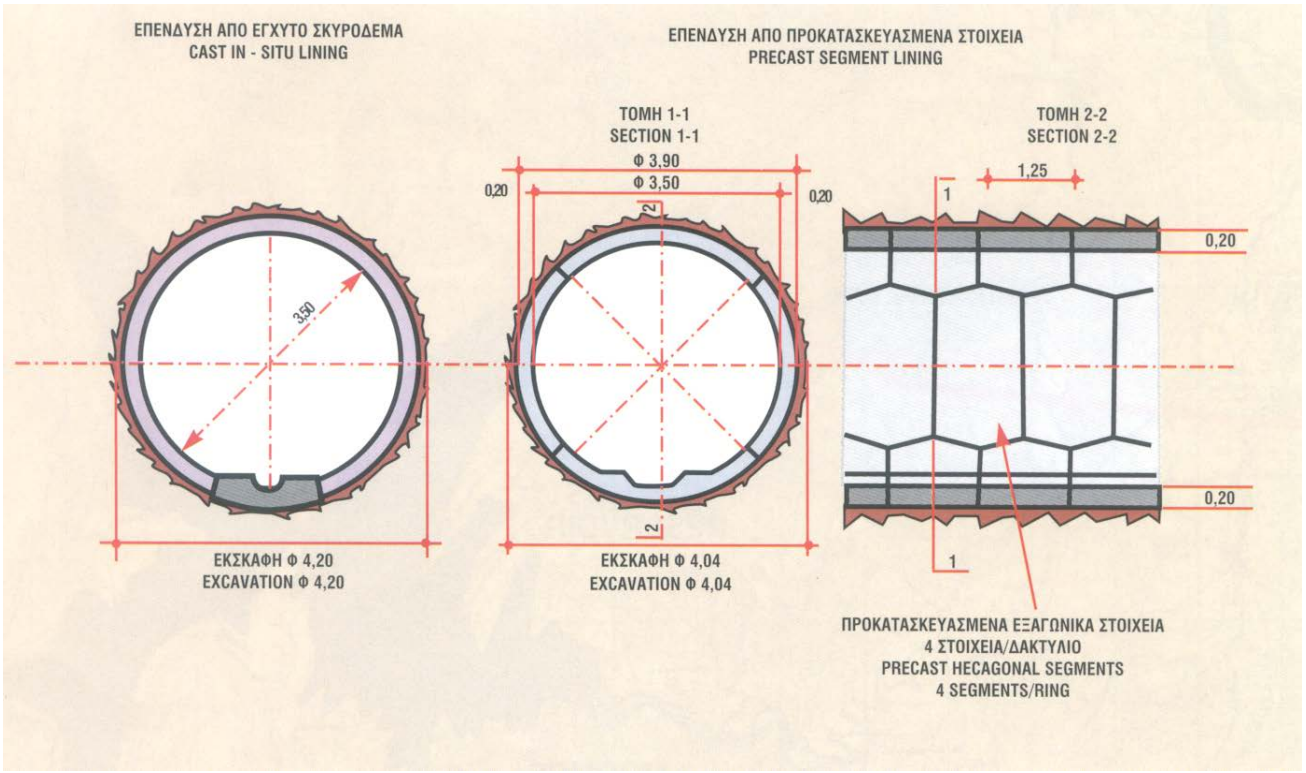
Σχήμα 2-17. Σήραγγες του Μετρό της Αθήνας, με τα περιτυπώματα των συρμών

2.5 Υδραυλικές σήραγγες

Οι υδραυλικές σήραγγες έχουν σκοπό τη μεταφορά υγρών, συνήθως νερού καθαρού ή με απόβλητα. Η διατομή των σηράγγων αυτών είναι συνήθως κυκλική, η δε διάμετρος τους ποικίλει ανάλογα με την απαιτούμενη ικανότητα παροχής. Για παράδειγμα η υδαταγωγός Σήραγγα Ευήνου -Μόρνου έχει συνολικό μήκος 29.400 m (Σχήμα 2-18) και εσωτερική διάμετρο 3.5 m (Σχήμα 2-19). Η διάμετρος εκσκαφής διαφέρει με βάση τις εκάστοτε απαιτήσεις στήριξης, που συναρτώνται άμεσα και με τις μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων. Οι κύριοι γεωλογικοί σχηματισμοί κατά μήκος της σήραγγας είναι λεπτοκοκκώδης φλύσχης (30%), χαοτικός και ψαμμιτικός φλύσχης (40%), ασβεστόλιθος του Ανωτέρου Κρητιδικού (20%) και μεταβατικές ζώνες και αργιλικός σχιστόλιθος (10%). Η διάνοιξη έγινε συγχρόνως από τέσσερα μηχανήματα ολομέτωπης κοπής, δύο από τα άκρα της σήραγγας (τμήματα AB1 και E1D1) και δύο από ενδιάμεση πρόσβαση (τμήματα CB1 και CD1). Τα δύο ακραία τμήματα AB1 και E1D1 έχουν διάμετρο εκσκαφής 4.2 m και μήκος 8.487 m και 3.427 m αντίστοιχα. Η διάνοιξη έγινε σε μέγιστο βάθος 1250m και 800 m αντίστοιχα, από δύο μηχανήματα ολομέτωπης κοπής (TBM) χωρίς ασπίδα και η αντιστήριξη με τη Νέα Αυστριακή Μέθοδο (NATM). Μετά την ολοκλήρωση της διάνοιξης ακολούθησε η επένδυση της σήραγγας από οπλισμένο σκυρόδεμα. Τα δύο ενδιάμεσα τμήματα CB1 και CD1 έχουν διάμετρο εκσκαφής 4.04m και μήκος 9.300 m και 8.178 m αντίστοιχα. Η διάνοιξη έγινε σε μέγιστο βάθος 1000m και 800m, από δύο μηχανήματα ολομέτωπης κοπής με διπλή ασπίδα, ακολουθούμενα από μηχάνημα τοποθέτησης της επένδυσης από προκατασκευασμένα στοιχεία.

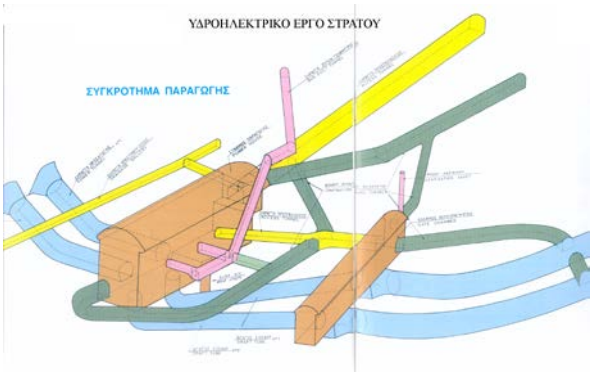


Σχήμα 2-18. Σήραγγα Ευήνου-Μόρνου

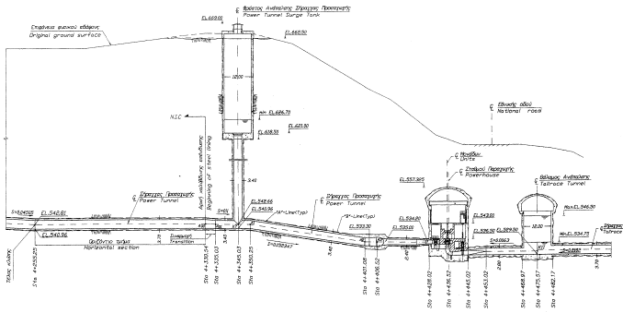


Σχήμα 2-19. Τυπικές διατομές σήραγγας Ευήνου-Μόρνου

Οι διαστάσεις της διατομής των υδαταγωγών σηράγγων είναι δυνατόν να είναι σχετικά μεγάλες, όπως π.χ. της σήραγγα εκτροπής του Αχελώου με ωφέλιμη διάμετρο 5.50m. Ειδικά στα ΥΗΕ η διοχέτευση του νερού από την υδροληψία, συνήθως από τεχνητό ταμιευτήρα, μέχρι την έξοδο, συνήθως σε ποταμό, απαιτεί την κατασκευή πληθώρας σηράγγων, όπως φαίνεται για παράδειγμα στο *Σχήμα **2-20***.



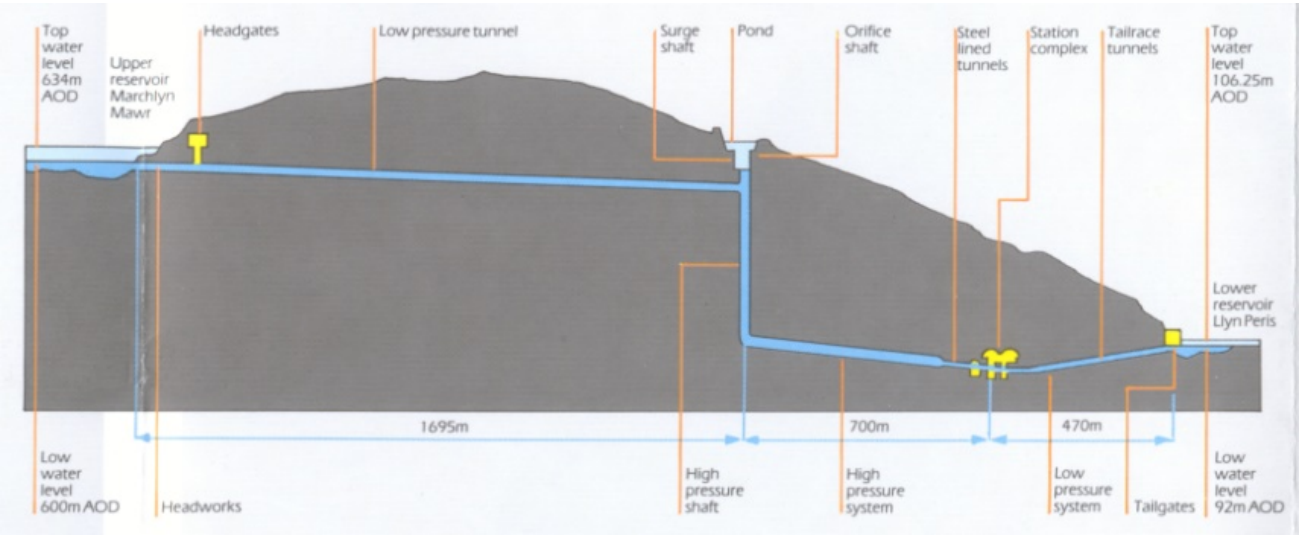
(α) Προοπτικό, ΥΗΣ Στράτου.



(β) Τομή στον άξονα του ΥΗΣ Μετσοβίτικου

Σχήμα 2-20. Υπόγεια συγκροτήματα παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας

Στο Σχήμα 2-21 φαίνεται το σύμπλεγμα του υπόγειου υδροηλεκτρικού σταθμού στο Dinorwig της Ουαλίας για παραγωγή και αποθήκευση ενέργειας με άντληση.



Σχήμα 2-21. Μηκοτομή υπόγειου υδροηλεκτρικού σταθμού αντλησιοταμίευσης στο Dinorwig της Ουαλίας για παραγωγή και αποθήκευση ενέργειας. Διακρίνονται από αριστερά προς τα δεξιά, ο άνω ταμιευτήρας, η σήραγγα προσαγωγής χαμηλής πίεσης, τα φρέατα ανάπαλσης και υψηλής πίεσης, οι σήραγγες υψηλής πίεσης, ο σταθμός, οι σήραγγες φυγής και ο κάτω ταμιευτήρας

Αντίθετα μικρότερης διαμέτρου σήραγγες, κατασκευάζονται για την αποχέτευση των πόλεων, μέχρι τους κεντρικούς αποχετευτικούς αγωγούς. Οι σήραγγες αυτές, λόγω των μειωμένων διαστάσεων τους επιβάλλουν συχνά την υιοθέτηση ειδικής τεχνολογίας.

2.6 Μορφή μεγάλων υπόγειων θαλάμων

Η ανάγκες του σύγχρονου πολιτισμού και η συνεχής ανάπτυξη των πόλεων απαιτεί την ικανοποίηση αυξημένων αναγκών για μεγάλους χώρους που θα διασφαλίζουν υψηλή στάθμη βιοτικού επιπέδου στους πολίτες, αυξημένη προστασία στο περιβάλλον και ασφάλεια στη χρήση. Η ακαταλληλότητα ή η αδυναμία ανεύρεσης επιφανειακών θέσεων για την κατασκευή τέτοιων χώρων, ώθησε στην αναζήτησή τους στην τρίτη διάσταση, την υπόγεια. Οι υπόγειοι χώροι παρουσιάζουν σημαντικά οικονομοτεχνικά αλλά και περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα έναντι των αντίστοιχων επιφανειακών εγκαταστάσεων, όπως :

- Περιορισμένες ανάγκες για επιφανειακούς χώρους και εγκαταστάσεις, γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό όταν το κόστος της γης είναι υψηλό, όπως π.χ. στην περίπτωση των χώρων αποθήκευσης που συνήθως βρίσκονται κοντά σε αστικές περιοχές.

- Σημαντική μείωση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης του τοπίου (οπτική ρύπανση) από επιφανειακά κτίσματα και εγκαταστάσεις. Επιπλέον, εξοικονομείται πολύτιμος χώρος για τη δημιουργία περιοχών δόμησης, πάρκων κ.α.
- Μικρότερος κίνδυνος καταστροφών από εκρήξεις, πυρκαγιές ή και δολιοφθορές, καθώς και υψηλότερη ασφάλεια σε καιρό πολέμου.
- Μεγάλη σταθερότητα θερμοκρασίας και υγρασίας.
- Μικρότερο κόστος (Zhao, et al., 1996) κατασκευής και συντήρησης από αντίστοιχους επιφανειακούς χώρους ίδιας δυναμικότητας. Για παράδειγμα η υπόγεια αποθήκευση πετρελαίου όγκου μεγαλύτερου των 100.000 m^3 έχει κόστος κατασκευής και συντήρησης σημαντικά μικρότερο από αντίστοιχες επιφανειακές δεξαμενές (*Froise, 1987).*
- Υπάρχει δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν ή να διατεθούν στην αγορά τα υλικά που προέρχονται από την εκσκαφή του υπόγειου χώρου.

Οι εφαρμογές των υπόγειων χώρων είναι ποικίλες. Ορισμένες από αυτές είναι :

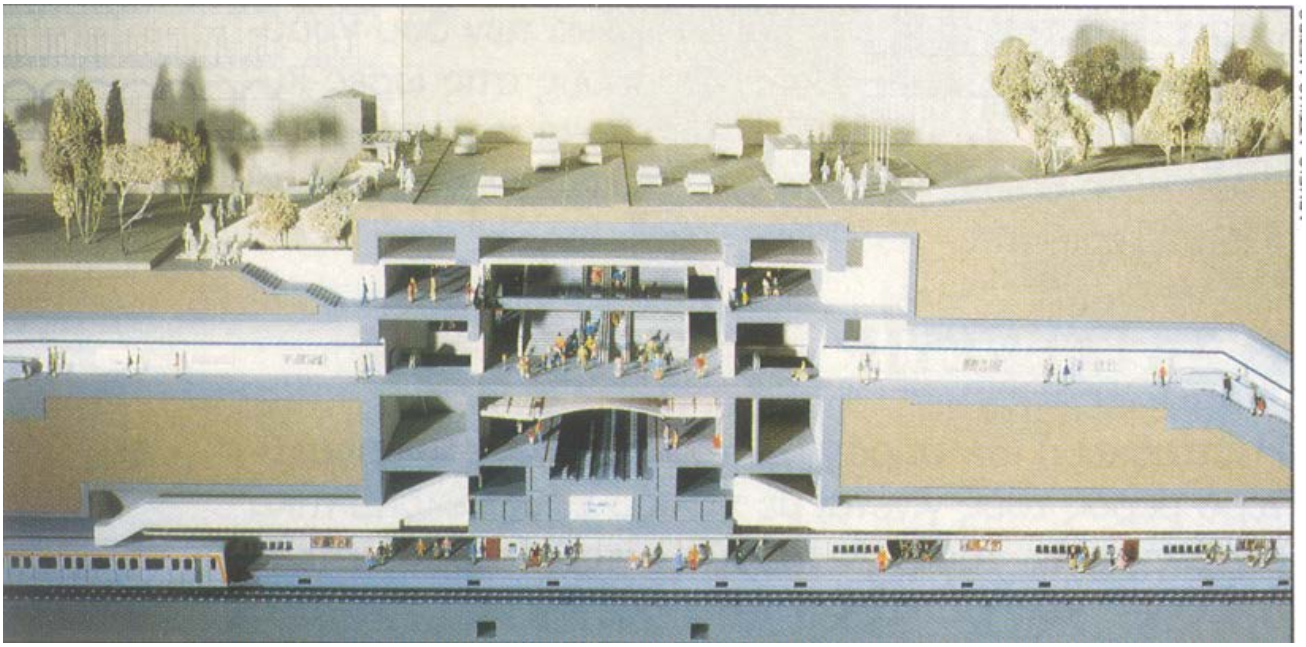
- Υπόγειοι χώροι στάθμευσης αυτοκινήτων
- Επεξεργασίας λυμάτων
- Χώροι κοινωφελούς χρήσης (γυμναστήρια, καταφύγια), κ.α. Στο Σχήμα 2-22 φαίνεται το υπόγειο στάδιο Gjøvik Olympic Mountain Hall, χωρητικότητας 5.000 ατόμων, που διανοίχθηκε σε διακλασμένο γνεύσιο, και φιλοξένησε τους χειμερινούς Ολυμπιακούς Αγώνες του 1994, στη Νορβηγία. Ο χώρος έχει διαστάσεις 61m πλάτος, 25m ύψος και 91m μήκος, είναι δε χωρητικότητας 5.000 ατόμων (Barton et al., 1992b; Bhasin et al., 1993.



Σχήμα 2-22. Άποψη του υπόγειου σταδίου GjØvik Olympic Mountain Hall, το οποίο φιλοξένησε τους χειμερινούς Ολυμπιακούς Αγώνες του 1994, στη Νορβηγία. Ο χώρος έχει διαστάσεις 61m πλάτος, 25m ύψος και 91m μήκος, και είναι χωρητικότητας 5.000 ατόμων (Wikipedia).

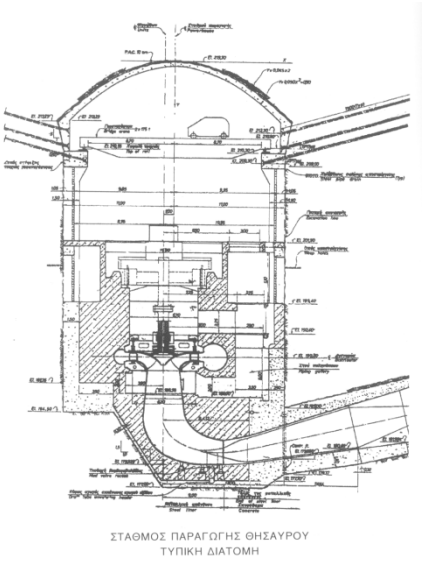
- Υπόγειοι σταθμοί αστικού σιδηροδρόμου (ΜΕΤΡΟ). Στο (Σχήμα 2-23) φαίνεται η μακέτα του υπόγειου σταθμού Συντάγματος του Μετρό Αθηνών, ο οποίος είναι ο μεγαλύτερος του έργου. Το έργο εμπεριέχει

δύο σταθμούς με τρεις εισόδους, είναι δε κατασκευασμένο σε τέσσερα υπόγεια επίπεδα με μέγιστο βάθος τα 30 m. Διακρίνονται, ο κυρίως χώρος του σταθμού, οι είσοδοι, καθώς και οι σήραγγες που κινούνται οι συρμοί.

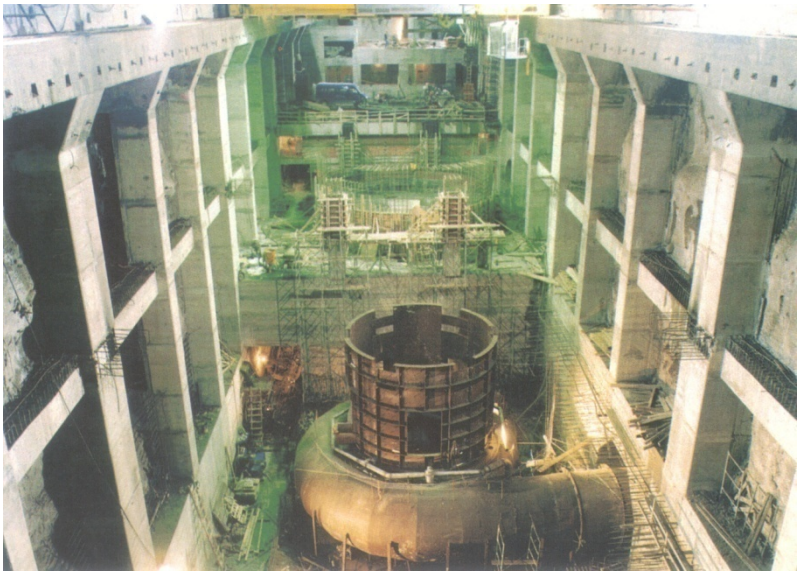


Σχήμα 2-23. Μακέτα του υπόγειου σταθμού Συντάγματος του Μετρό Αθηνών, ο οποίος είναι ο μεγαλύτερος του έργου. Κατασκευάζονται δύο σταθμοί, με τρεις εισόδους και το μέγιστο βάθος φθάνει τα 30 m, σε τέσσερα επίπεδα.

- Περιοχές διεύρυνσης συγκοινωνιακών σηράγγων για στάθμευση ή συνένωση κλάδων.



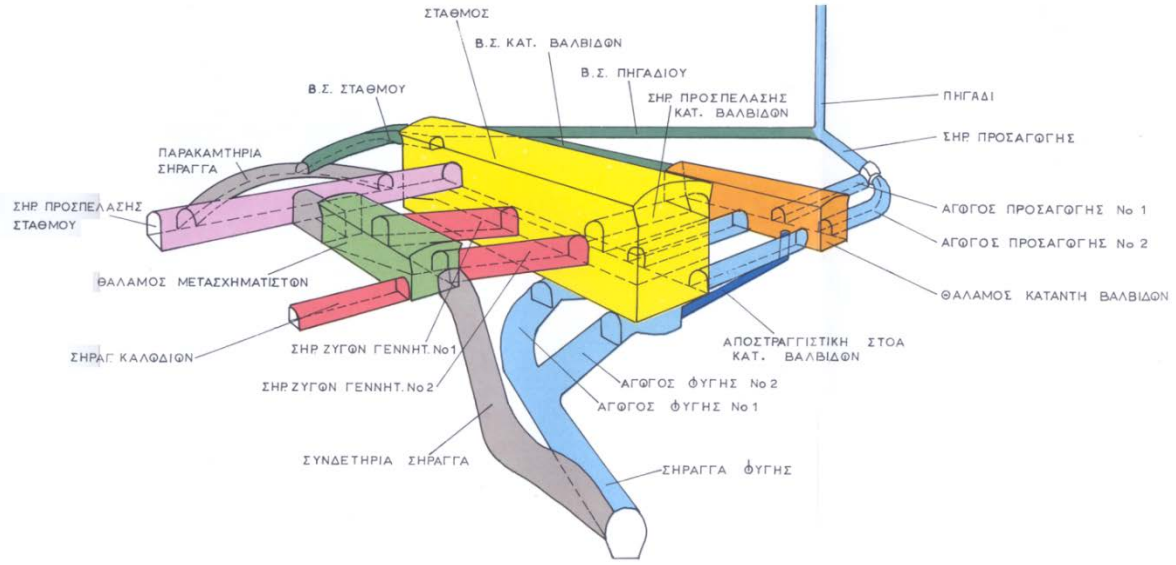
(α) Τυπική διατομή



(β) Τοποθέτηση γεννητριών στο θάλαμο παραγωγής

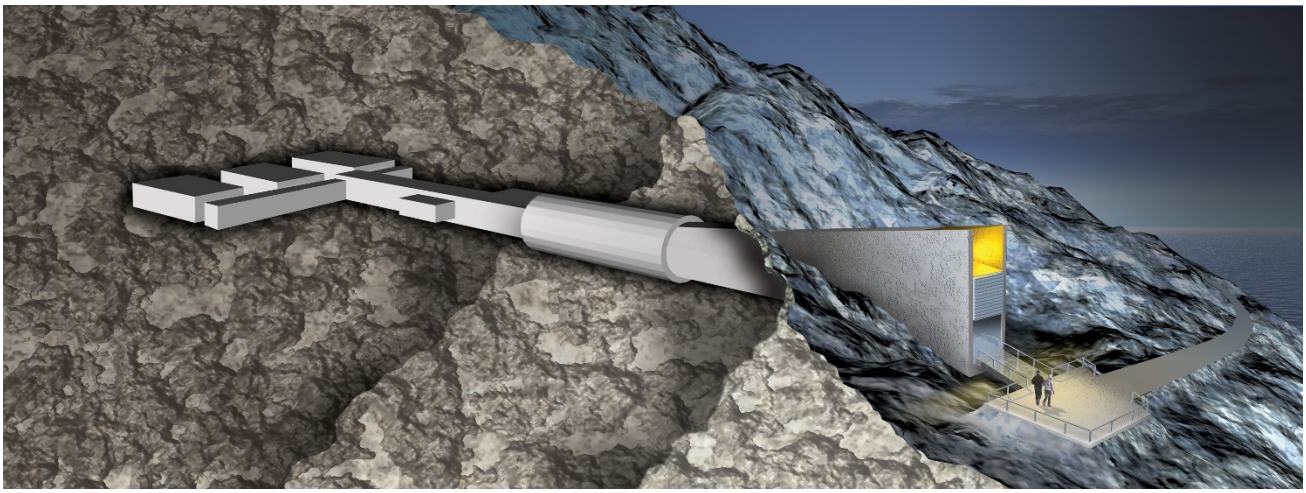
Σχήμα 2-24. ΥΗΣ Θησαυρού

- Υδροηλεκτρικοί σταθμοί. Στο Σχήμα 2-24 φαίνεται η διατομή και το εσωτερικό του ΥΗΣ Θησαυρού. Στο Σχήμα 2-25 φαίνεται το σύμπλεγμα των υπογείων έργων του υδροηλεκτρικού σταθμού πηγών Αώου, ενός άλλου από τους 5 υπόγειους υδροηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας στην Ελλάδα (Πολύφυτου, Ασωμάτων, Στράτου, Πηγών Αώου, και Θησαυρού).



Σχήμα 2-25. Υπόγειος υδροηλεκτρικός σταθμός πηγών Αώου

- Υπόγειες αποθήκες υγρών και αερίων καυσίμων (Hosoien, 1986) ή νερού. Στο *Σχήμα 4-25* φαίνεται χώρος υπόγειας αποθήκευσης πετρελαίου.
- Αποθήκες διατήρησης προϊόντων (Σχήμα 2-26) σε χαμηλές θερμοκρασίες (cold storage).
- Χώροι θερμοσυσσώρευσης.
- Υπόγειοι πυρηνικοί σταθμοί.
- Χώροι απόθεσης πυρηνικών και τοξικών αποβλήτων.
- Στρατιωτικές εγκαταστάσεις.



Σχήμα 2-26. Θάλαμος παγκόσμιας αποθήκευσης σπόρων (Svalbard Global Seed Vault)

Βιβλιογραφία

Barton N., Loset F., Lien R., Lunde J. 1981, “Application of Q-System in Design Decisions Concerning Dimensions and Appropriate Support for Underground Installations”, Rockstore '80, Stockholm, Vol. 2, pp.553-561

Bickel J.O., Kuesel T.R. and King E.H. (1996) “Tunnel Engineering Handbook”, Ch. 2, I.T.P., Chapman & Hall.

Froise S. 1987, “Hydrocarbon Storage in Unlined Rock Caverns: Norway's Use and Experience”. Tunelling and Underground Space Technology, Vol. 2.

Hosoien N. 1986, “Crude Oil Caverns at Mongstad, Norway”, Proc. of Int. Symp.on Large Rock Caverns, Helsinki, Finland, Vol. 1, pp.109-120

Kaiser P.K. 1986, “General Report”. Proc. of Int. Symp.on Large Rock Caverns, Helsinki, Finland, Vol. 3, pp.1877-1907

Maidl B. (2004) “Handbuch des Tunnel- und Stollenbaus”, Band II, Gluckauf.

PIARC (-). “Road Tunnels Manual, ch. 6 Geometry”.

Ril 853 (2002). Eisenbahntunnel planen, bauen, und instand halten. In: DB Netz AG, Juni.

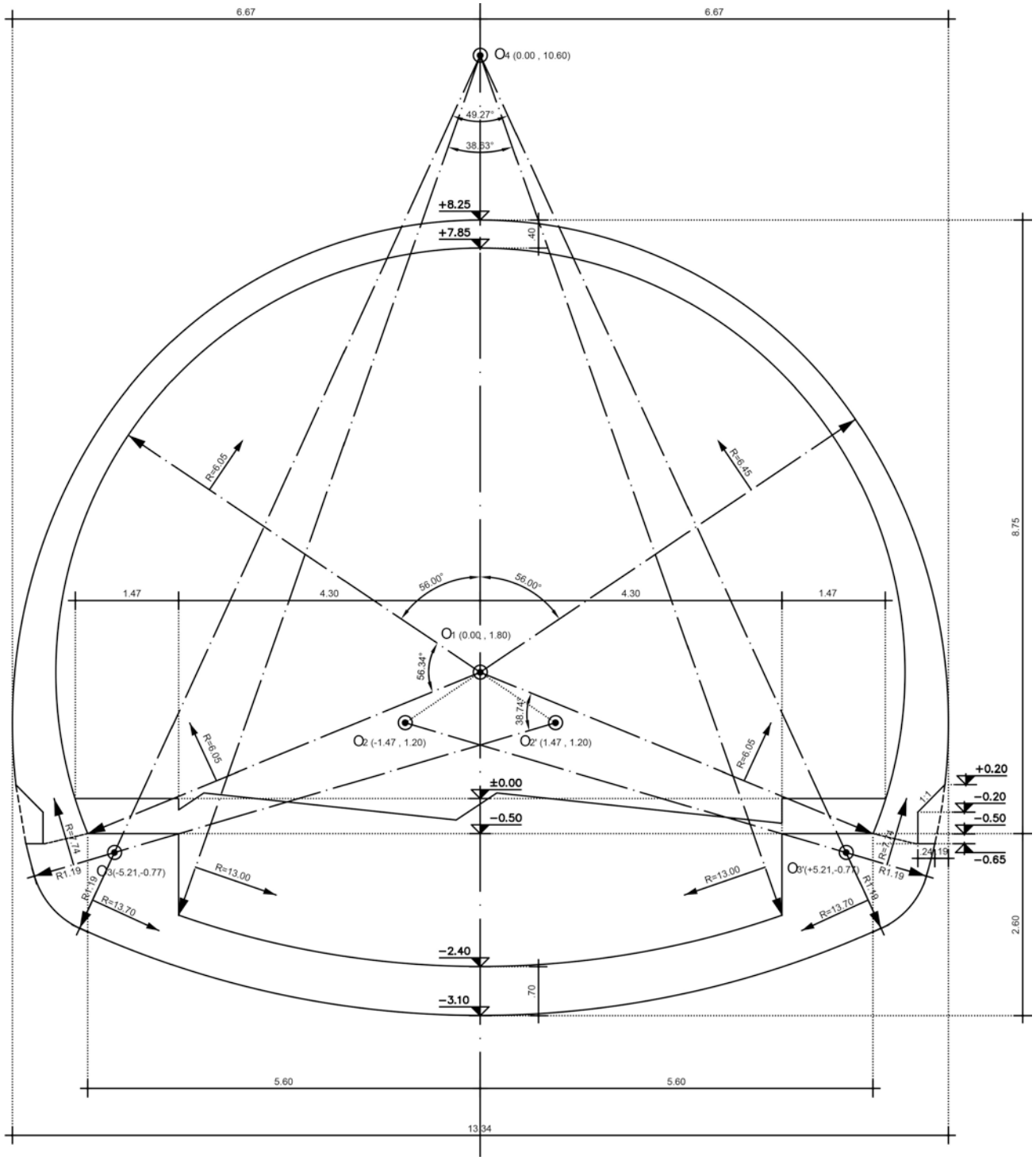
Σακκάς Ι, Αγγέλης Ε, Μπακογιάννης Ι, Καζίλης Ν, Ρόζενμπεργκ Α, Σοφιανός ΑΙ, Μιχάλης Η, Αντωνίου Γ (2002). «ΟΜΟΕ - Τεύχος Οδικών Σηράγγων» ΥΠΕΧΩΔΕ.

Zhao J., Choa V., Broms B.B. 1996, “Construction and Utilization of Rock Caverns in Singapore, Part B”. Tunelling and Underground Space Technology, Vol. 11, No. 1

Κριτήρια αξιολόγησης

Κριτήριο αξιολόγησης 1

Σχεδιάστε με χάρακα και διαβήτη την εγκάρσια διατομή της σιδηροδρομικής σήραγγας του Σχήματος.

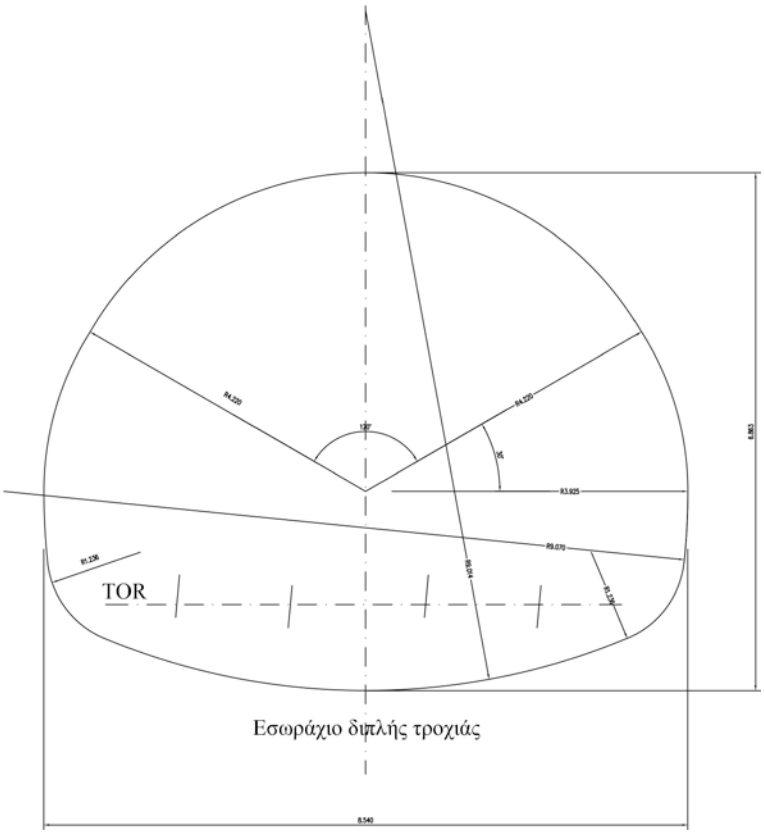


Σχήμα 2-27. Διατομή σιδηροδρομικής σήραγγας έξι τόξων

Απάντηση/Λύση

Κριτήριο αξιολόγησης 2

Σχεδιάστε την παρακάτω διατομή του Μετρό της Αθήνας

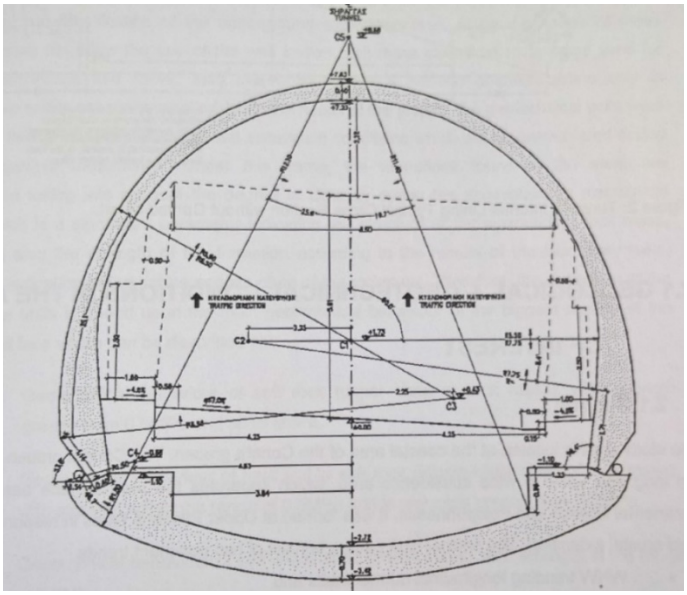


Σχήμα 2-28. Καθορισμός των τεσσάρων τόξων για τη σχεδίαση του εσωράχιου σήραγγας του Μετρό της Αθήνας.

Απάντηση/Λύση

Κριτήριο αξιολόγησης 3

Σχεδιάστε την παρακάτω διατομή της οδικής σήραγγας του Πλατάνου.



Σχήμα 2-29. Τυπική διατομή, μόνιμης επένδυσης με ανάστροφο τόξο, της οδικής σήραγγας Πλατάνου.

Απάντηση/Λύση

Κριτήριο αξιολόγησης 4

Στα πλαίσια κατασκευής σύγχρονου αυτοκινητοδρόμου πρόκειται να κατασκευαστεί σήραγγα μίας κατεύθυνσης κυκλοφορίας, μήκους 1500 m, με κατά μήκος κλίση 2%. Ύστερα από σχετική κυκλοφοριακή μελέτη η Ετήσια Μέση Ημερήσια Κυκλοφορία (ΕΜΗΚ) προσδιορίσθηκε σε 40000 οχήματα / 24h.

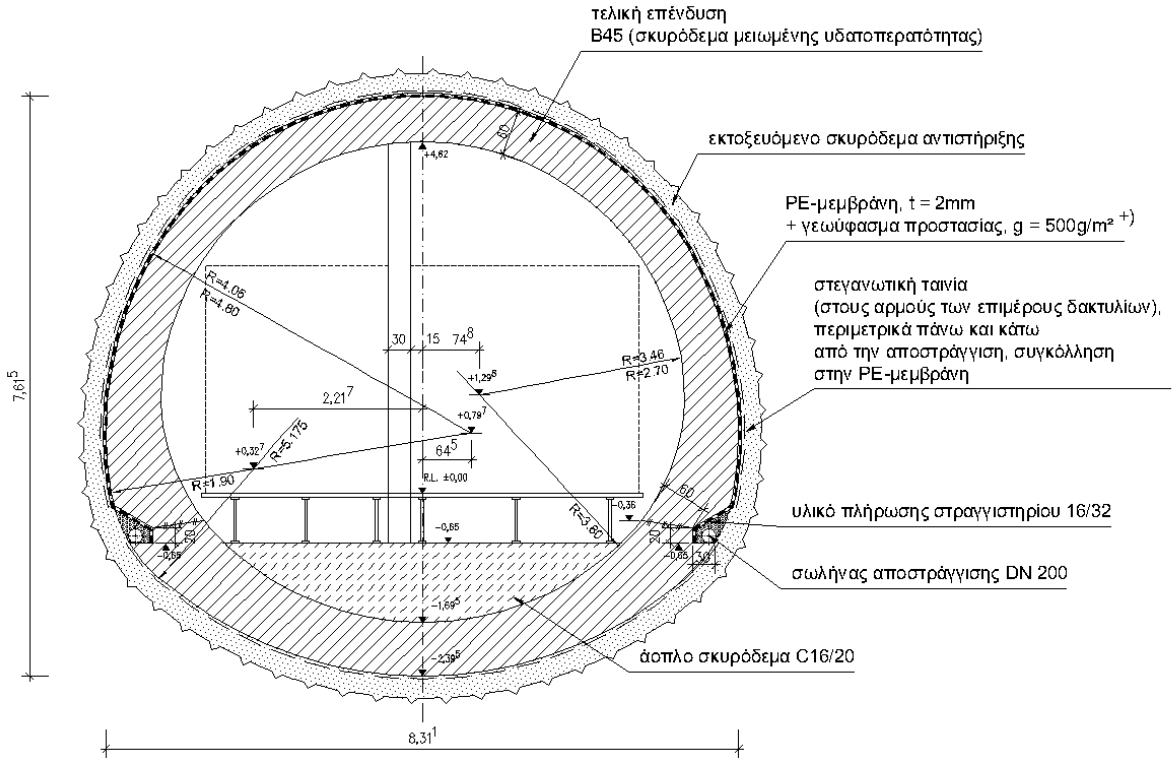
α) προσδιορίστε τον τύπο της διατομής της οδού.

β) σχεδιάστε τις τυπικές διαστάσεις του περιτυπώματος της διατομής λαμβάνοντας υπόψη ότι το ελάχιστο απαιτούμενο ελεύθερο ύψος για την μηχανοκίνητη κυκλοφορία ανέρχεται σε 4.50m.

γ) υπολογίστε τον αριθμό των απαιτούμενων εσοχών στάθμευσης, και σχεδιάστε μία τυπική διαμόρφωσή τους.

δ) υπολογίστε τον απαιτούμενο αριθμό των εξόδων διαφυγής και σχεδιάστε μία τυπική διαμόρφωση της διατομής τους

Απάντηση/Λύση



Σχήμα 2-30. Σήραγγα αυτοκινητοδρόμου

Κεφάλαιο 3

Σύνοψη
Η εφικτότητα, η μέθοδος διάνοιξης και το κόστος της κατασκευής ενός υπογείου έργου βασίζονται στις γεωλογικές συνθήκες της περιοχής του. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιείται, σε στάδια γεωτεχνική διερεύνηση, διαχωρίζονται οι περιοχές με παρόμοιες συνθήκες, και τέλος προσδιορίζονται οι γεωτεχνικές παράμετροι που απαιτούνται στους στατικούς υπολογισμούς. Εμπέδωση επιτυγχάνεται με λυμένα παραδείγματα και ασκήσεις.

Προαπαιτούμενη γνώση
Μαθήματα: Τεχνική Γεωλογία, Μηχανική των πετρωμάτων. Χρήσιμη βιβλιογραφία: Attewell, (1995), Bell (2008).

3. Γεωτεχνική έρευνα και χαρακτηρισμός γεωμάζας[3]

3.1 Εισαγωγή

Βασικός παράγων που επηρεάζει ή και επιβάλλει την επιλογή της μεθόδου διάνοιξης είναι το γεωλογικό υλικό και τα υπόγεια νερά. Ειδικότερα, όταν αυτό είναι έδαφος δηλ. άργιλος, χαλίκια, άμμος, αποσαθρωμένο πέτρωμα σε διάφορες καταστάσεις διάβρωσης, κλπ., ταξινομείται γενικά σαν υλικό εύκολα εκσκάψιμο με χειρονακτικές μεθόδους.

Στην περίπτωση που το γεωλογικό υλικό είναι πέτρωμα (βράχος), αυτό χαρακτηρίζεται πρωταρχικά, ως προς την εκσκαψιμότητα, από τη μονοαξονική αντοχή του άρρηκτου υλικού. Αυτή καλύπτει ένα μεγάλο φάσμα από τα ασθενή ιζηματογενή πετρώματα με αντοχή 10 - 40 MPa έως τα ισχυρά πυριγενή πετρώματα με αντοχή 150-300 MPa.

Οι χαμηλές τιμές της αντοχής είναι πολλές φορές πιο συμφέρουσες για τη μηχανική εκσκαφή αλλά απαιτούν την τοποθέτηση υποστήριξης, ενώ οι υψηλές τιμές της αντοχής πιθανόν αποκλείουν την μηχανική εκσκαφή, αλλά απαιτούν ελάχιστη προσωρινή ή και μόνιμη υποστήριξη. Όταν το μέτωπο της σήραγγας διέρχεται από ένα διαχωριστικό ορίζοντα του βράχου με το έδαφος, τότε καταλήγει ένα τμήμα του μετώπου να βρίσκεται μέσα σε έδαφος ή ισχυρά αποσαθρωμένο πέτρωμα, ενώ το υπόλοιπο μέτωπο να βρίσκεται μέσα σε σκληρό πέτρωμα. Αυτή η κατάσταση, που ονομάζεται μικτό μέτωπο, δημιουργεί προβλήματα, ιδιαίτερα κατά τη μηχανική εκσκαφή της σήραγγας και την υποστήριξή της.

Σκοπός της γεωτεχνικής διερεύνησης είναι η πρόγνωση των γεωτεχνικών συνθηκών που θα συναντηθούν κατά τη διάνοιξη της σήραγγας. Η μελέτη του έργου θα στηριχθεί στις συνθήκες αυτές για την επιλογή της μεθόδου εξόρυξης, για τη διαστασιολόγηση των μέτρων υποστήριξης και για την εκτίμηση του μεγέθους των υπερεκσκαφών. Από την ορθή προεκτίμησή τους θα εξαρτηθεί η επιτυχία του έργου.

Η γεωμάζα διακρίνεται αδρά σε έδαφος και σε πέτρωμα (βράχο-βραχομάζα). Ο διαχωρισμός αυτός δύναται βασίζεται σε συμβατικές απαιτήσεις, στην αντοχή της ή και στη μηχανική της απόκριση. Συμβατικά, έδαφος είναι η γεωμάζα που δύναται να εκσκαφτεί με κοινά συμβατικά χωματουργικά μηχανήματα, ενώ πέτρωμα ονομάζεται η γεωμάζα που δεν μπορεί να εκσκαφτεί με τα μηχανήματα αυτά. Με βάση τη μονοαξονική αντοχή της γεωμάζας, ονομάζεται ως έδαφος όταν η μονοαξονική της αντοχή είναι μικρότερη από 1 MPa, και ως πέτρωμα όταν είναι μεγαλύτερης αντοχής. Επίσης, η συμπεριφορά της γεωμάζας κατά την υπόγεια διάνοιξη, δύναται να ονομαστεί ως εδαφική όταν δύναται να αναλάβει μεγάλες παραμορφώσεις χωρίς την αποδιοργάνωση και πρακτικά την απώλεια της αρχικά σημαντικής αντοχής της (>1MPa), και ως βράχου σε αντίθετη περίπτωση.

[3] Με τον όρο αυτό αποδίδεται ο αγγλικός όρος «ground»

3.1.1 Έδαφος

3.1.1.1 Χαρακτηρισμός και ιδιότητες

Ο χαρακτηρισμός των εδαφών, με βάση τα στοιχεία της γεωτεχνικής διερεύνησης γίνεται με την κοκκομετρική διαβάθμισή τους (π.χ. BS5930: 1999, Πίνακας 3-1), το χαρακτηρισμό της σχετικής πυκνότητάς των κοκκωδών εδαφών ή της συνεκτικότητας των λεπτόκοκκων εδαφών, και την περατότητά τους.

Πίνακας 3-1 Γενική σύνθεση εδαφών

Τύπος εδάφους	**Ονομασία εδάφους**	**Μέγεθος κόκκου [mm]**
Χονδρόκοκκο	Τροχμάλα	>200
	Κροκάλα	200-60
	Χαλίκι	60-2
	Άμμος	2-0.06
Λεπτόκοκκο	Ιλύς	0.06-0.002
	Άργιλος	<0.002

Σημαντικές μηχανικές ιδιότητες των εδαφών στη σηραγγοποιΐα είναι η αντοχή, η παραμορφωσιμότητα και η περατότητα. Ο Πίνακας 3-2 δίνει μέσες μηχανικές παραμέτρους των εδαφών, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη φάση προκαταρκτικών στατικών υπολογισμών.

Πίνακας 3-2. Μέσες παράμετροι του εδάφους για προμελέτη (Kany, 1974)

Εδάφη	**γ kN/m³**	**γ΄ kN/m³**	**φ ή φ΄ °**	**c΄ kPa**	**c_u kPa**	**E_s MPa**
Μη συνεκτικά						
Άμμος, χαλαρή, στρογγυλή	18	10	30	-	-	20-50
Άμμος, χαλαρή, γωνιώδης	18	10	32.5	-	-	40-80
Άμμος, μέτρια πυκνή, στρογγυλή	19	11	32.5	-	-	50-100
Άμμος, μέτρια πυκνή, γωνιώδης	19	11	35	-	-	80-150
Χαλίκι δίχως άμμο	16	10	37.5	-	-	100-200
Φυσικά γωνιώδη σκύρα	18	11	40	-	-	150-300
Συνεκτικά						
Άργιλος, ημίσκληρη	19	9	25	25	50-100	5-10
Άργιλος, στιφρή	18	8	20	20	25-50	2-5
Άργιλος, μαλακή	17	7	17.5	10	10-25	1-2.5
Geschiebemergel, fest	22	12	30	25	200-700	30-100
Lehm, ημίσκληρη	21	11	27.5	10	50-100	5-20
Lehm, μαλακή	19	9	27.5	-	10-25	4-8
Ιλύς	18	8	27.5	-	10-50	3-10

Η διαπερατότητα των εδαφών κυμαίνεται (σε m/s) μεταξύ $10^{-2}\div10^{-4}$ για χαλίκια και χονδρόκοκκες άμμους, $10^{-3}\div10^{-5}$ για άμμους, $10^{-4}\div10^{-8}$ για αμμώδεις ιλύες και ιλύες,, και $10^{-7}\div10^{-11}$ για ιλυώδεις αργίλους και αργίλους.

3.1.1.2 Συμπεριφορά κατά τη διάνοιξη

Το βάθος κατασκευής της σήραγγας και η θέση του υδροφόρου ορίζοντα αποτελούν σημαντικότατους παράγοντες στη συμπεριφορά των εδαφών επί τόπου. Ο Πίνακας 3-3 δίνει την ταξινόμηση των εδαφών με βάση τη συμπεριφορά τους κατά τη διάνοιξη σηράγγων, λαμβάνοντας υπόψη και τους δύο τελευταίους σημαντικούς παράγοντες.

3.1.1.3 Εξόρυξη

Τα εδάφη, σύμφωνα και με το συμβατικό τους προσδιορισμό εξορύσσονται με κοινά εκσκαπτικά μέσα, συνήθως με τσάπα (εκσκαφέα).

3.1.1.4 Υπερεκσκαφή

Στα εδάφη, η υπερεκσκαφή δύναται είτε να είναι αιτιολογημένη προκειμένου να αντισταθμίσει αναμενόμενες συγκλίσεις είτε να οφείλεται στις ανάγκες της προϋποστήριξης. Γενικά όμως, η εκσκαφή δύναται να επιτευχθεί με ακρίβεια σύμφωνα με τα σχέδια της μελέτης.

Πίνακας 3-3. Ταξινόμηση εδαφών για κατασκευή σηράγγων (Heuer, 1974)

Ταξινόμηση εδάφους		Συμπεριφορά	Τυπικά εδάφη
Σταθερό (Firm)		Προχώρηση δύναται να γίνει χωρίς αρχική υποστήριξη και η τελική επένδυση δύναται να κατασκευασθεί προτού το έδαφος αρχίσει να κινείται	Ασβεστιτικός πηλός πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα, σκληρή άργιλος, μάργα, συγκολλημένη άμμος ή χαλίκι σε όχι υψηλή ένταση.
Θρυμματιζόμενο (Raveling)	**αργά**	Τεμάχια ή λέπια υλικού αρχίζουν να πέφτουν μετά τη διάνοιξη λόγω χαλάρωσης ή υπερέντασης και ψαθυρής θραύσης. Στο γρήγορο θρυμματισμό η διαδικασία αρχίζει μέσα σε λίγα λεπτά.	Υπολειμματικό έδαφος ή άμμος με μικρή ποσότητα συνδετικού υλικού χαλαρώνει γρήγορα κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα και αργά πάνω από αυτόν. Στιφρές ρωγματωμένες άργιλοι χαλαρώνουν αργά ή γρήγορα ανάλογα με το βαθμό υπερφόρτισης τους.
	γρήγορα		
Συνθλιβόμενο (squeezing)		Το πέτρωμα συνθλίβεται ή εξωθείται πλαστικά στη σήραγγα χωρίς ορατή θραύση ή απώλεια συνέχειας και χωρίς αισθητή αύξηση της υγρασίας. Όλκιμη πλαστική διαρροή και ροή λόγω υπερφόρτισης.	Έδαφος με μικρή αντοχή τριβής. Ο ρυθμός σύνθλιψης εξαρτάται από το βαθμό υπερφόρτισης. Συμβαίνει σε μικρό ή μέτριο βάθος σε άργιλο πολύ μαλακής έως μέτριας συνεκτικότητας. Στιφρή έως σκληρή άργιλος σε μεγάλο βάθος μπορεί να μετακινηθεί σε συνδυασμό με χαλάρωση στην επιφάνεια εκσκαφής και σύνθλιψη σε βάθος πίσω από το μέτωπο.
Κοκκώδες ή τρεχούμενο (Running)	**συνεκτικό (φαινομενικά)**	Κοκκώδη εδάφη χωρίς συνοχή είναι ασταθή για κλίση μεγαλύτερη της γωνίας απόθεσης (30°-35°). Για μεγαλύτερες γωνίες κυλούν σαν αμμοθύνες έως ότου η γωνία φθάσει τη γωνία απόθεσης.	Καθαρά, ξηρά κοκκώδη υλικά. Φαινόμενη συνοχή σε ύφυγρη άμμο ή ασθενής συγκόλληση κοκκώδους εδάφους δύναται να τους επιτρέψει να σταθούν για λίγο χαλαρώνοντας για λίγο προτού κατακρημνισθούν.
	χωρίς συνοχή		
Ρέον (Flowing)		Ένα μίγμα εδάφους και νερού ρέει στη σήραγγα σαν ιξώδες υγρό. Το υλικό δύναται να εισβάλει από το δάπεδο ή το μέτωπο ή τη στέψη ή τα τοιχώματα και να ρεύσει σε μεγάλες αποστάσεις γεμίζοντας μερικές φορές πλήρως το άνοιγμα.	Κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα σε ιλύες, άμμους ή χαλίκια χωρίς επαρκή περιεκτικότητα σε άργιλο ώστε να έχουν σημαντική συνοχή και πλαστιμότητα. Δύναται επίσης να συμβαίνει σε ευαίσθητες αργίλους όταν είναι διαταραγμένες.
Διογκούμενο (Swelling)		Το έδαφος απορροφά νερό, αυξάνει σε όγκο και διευρύνεται αργά προς τη σήραγγα.	Ισχυρά προστερεοποιημένη άργιλος με δείκτη πλαστιμότητας πάνω από 30, που γενικά έχει σημαντική περιεκτικότητα μοντμοριλλονίτη.

3.1.2 Πέτρωμα – βραχομάζα

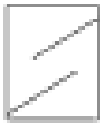
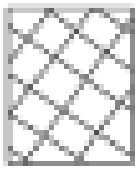
3.1.2.1 Χαρακτηρισμός και ιδιότητες

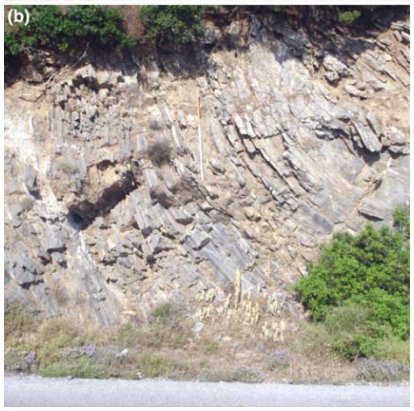
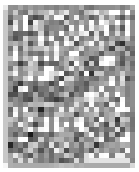
Το πέτρωμα χαρακτηρίζεται με βάση τον τύπο του, τον πετρολογικό, πετρογραφικό και ορυκτολογικό του χαρακτηρισμό, την ορυκτολογική του σύσταση, το βαθμό αποσάθρωσής του, την αντοχή του και τον τεκτονισμό του, εκ των οποίων ο τελευταίος έχει καθοριστική σημασία στα σκληρά πετρώματα. Ο Πίνακας 3-4 δίνει το χαρακτηρισμό των βραχωδών σχηματισμών, σύμφωνα με τους Deere et al. (1970) και το σύστημα GSI, με βάση τον τεκτονισμό τους ή τη μηχανική τους συμπεριφορά.

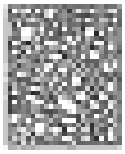
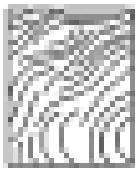
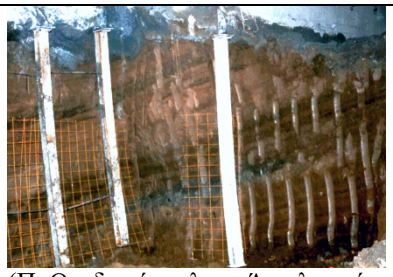
Τα παραπάνω χαρακτηριστικά του πετρώματος επιτόπου σε συνδυασμό με τις υδρογεωλογικές συνθήκες, το εντατικό πεδίο και το μέγεθος, μορφή και σημασία του έργου χρησιμοποιούνται επιλεκτικά από τις διάφορες μεθόδους ταξινόμησης για το χαρακτηρισμό της ποιότητάς του. Τα συστήματα ταξινόμησης παρέχουν στατιστικά μέσα περιγραφής των χαρακτηριστικών των πετρωμάτων και πρόβλεψης της απόκρισης τους στη διάνοιξη. Παρέχουν επίσης τις παραμέτρους αντοχής και παραμορφωσιμότητας της βραχομάζας που απαιτούνται για την αριθμητική ανάλυση της συμπεριφοράς της επιλεγμένης μεθόδου διάνοιξης. Η βραχομάζα μπορεί να αναλυθεί με την υπόθεση ότι είναι είτε συνεχής είτε ασυνεχής. Εάν υποτεθεί συνεχής, οι οπτικά εκτιμούμενες ή εργαστηριακά καθοριζόμενες παράμετροι του υλικού πρέπει να μειωθούν για να αντιπροσωπεύσουν την αντοχή και παραμορφωσιμότητα της βραχομάζας. Εάν υποτεθεί ασυνεχής, απαιτούνται παράμετροι για την προσομοίωση τόσον των ασυνεχειών όσον και του συνεχούς υλικού μεταξύ τους.

Μερικές παράμετροι του συνεχούς μέσου, όπως το μέτρο παραμορφωσιμότητας της βραχομάζας, μπορούν να εκτιμηθούν τόσον από τα δύο συστήματα, RMR και Q, όσον και από τον Γεωλογικό Δείκτη Αντοχής (GSI) (Hoek *et al.,* 1995˙ Hoek, 2000). Από τον τελευταίο μπορεί επίσης να υπολογιστούν παράμετροι που απαιτούνται για τα κριτήρια αστοχίας Hoek-Brown και Mohr-Coulomb. Οι παράμετροι που απαιτούνται, για τις αναλύσεις ασυνεχούς μέσου, μπορούν να εκτιμηθούν σύμφωνα με σχετικές οδηγίες (πχ. Barton et al., 1992˙ Barton & Choubey, 1977˙ Barton & Bandis, 1982). Στις περισσότερες περιπτώσεις η δομική επένδυση των σηράγγων σε βράχο σχεδιάζεται υποθέτοντας ότι θα φορτιστεί από τη μετακίνησή της συνεχούς βραχομάζας προς την εκσκαφή.

Πίνακας 3-4. Χαρακτηρισμός βραχωδών σχηματισμών, σύμφωνα με τους Deere et al. (1970) ή το GSI

Απόσταση ασυνεχειών (cm) - Δομή	**Χαρακτηρισμός πετρώματος Deere - GSI**	**Φωτογραφική τεκμηρίωση**	
70 	1. Σκληρό και συμπαγές (Hard and intact) Ακέραιο ή μαζώδες (Intact or massive)	 (Δ. Ρόζος. Μολάσσες Μετεώρων).	 (Δ. Ρόζος. Γνευσιογρανίτης Ικαρίας).
50	2. Σκληρό διαστρωμένο ή σχιστώδες (Hard stratified or schistose) -	 (Κ. Λουπασάκης. Γνεύσιοι Καβάλας).	
30 	3. Μαζώδες, μέτρια κερματισμένο (Massive, moderately jointed) Κερματισμένο (Blocky)	 (Δ. Ρόζος. Μάρμαρα Ραμπεντώσας).	 (Δ. Ρόζος. Ασβεστόλιθοι Λεωνιδίου)  (Τσιαμπάος & Σαρόγλου. Διαστρωμένο μάρμαρο)

20	4. Μέτρια κερματισμένο και με ενστρώσεις (Moderately blocky and seamy)	 (Δ. Ρόζος. Φλύσχης Περιοχής Ιωαννίνων).	  (Τσιαμπάος & Σαρόγλου. (α) ψαμμίτης, (β) ασβεστόλιθος)
	Πολύ κερματισμένο (Very blocky)	 (Δ. Ρόζος. Σχιστοκερατόλιθοι Αχαΐας)	
10	5. Πολύ κερματισμένομε ενστρώσεις, και διαρρηγμένο (Very blocky seamy and shattered)	 (Δ. Ρόζος. Φλύσχης Περιοχής Αγρινίου).	  (Τσιαμπάος & Σαρόγλου. Πτυχομένοι (α) λεπτοπλακώδης ασβεστόλιθος, (β) σχιστόλιθος)
	Ισχυρά κερματισμένο, διαρρηγμένο και εύκολα διαχωριζόμενο πέτρωμα. Blocky/Disturbed/ Seamy	 (Δ. Ρόζος. Φλύσχης Περιστερίου Ιωαννίνων).	

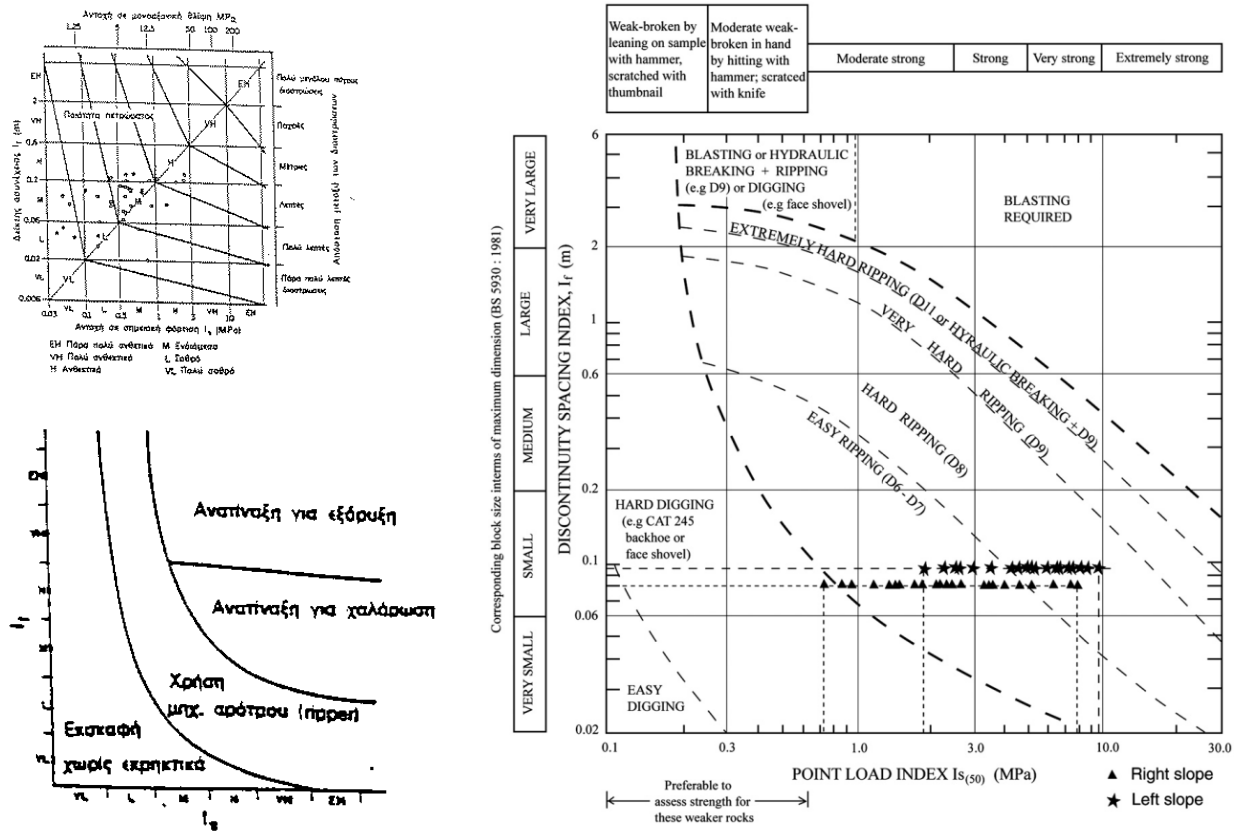
5	6. Πλήρως θρυμματισμένο (Completely crushed)  Θρυμματισμένο πέτρωμα. (Disintegrated)	 (Δ. Ρόζος. Ασβεστόλιθοι Παραμυθιάς).	 (Τσιαμπάος & Σαρόγλου. Ισχυρά κερματισμένος ασβεστόλιθος)
	-  Φυλλόμορφο/διατμημένο πέτρωμα (Laminated/Sheared)	 (Δ. Ρόζος. Φλύσχης Περιστερίου Ιωαννίνων).	
2	7. Χάλικες και άμμοι (Gravel and sand)	 (Δ. Ρόζος. Αμμοχάλικα Φωκιανού).	
Ασθενές και συνεκτικό	8. Συνθλιβόμενο σε μέτριο βάθος, (Squeezing, moderate depth) 9. Συνθλιβόμενο σε μεγάλο βάθος (Squeezing, great depth)		
	10. Διογκούμενο (Swelling)	 (Π. Θεοδωρόπουλος. Άργιλοι σήραγγας Καλλίδρομου).	

3.1.2.2 Συμπεριφορά κατά τη διάνοιξη

Οι περισσότερες σήραγγες τεχνικών έργων εκσκάπτονται σε μέτρια βάθη. Σε σκληρά πετρώματα μπορεί να υποτεθεί ότι η αντοχή τους θα είναι πολύ μεγαλύτερη από τις δράσεις που υφίστανται. Σε αυτήν την περίπτωση οι ασυνέχειες θα ελέγχουν τη σταθερότητα της βραχομάζας, και αρκεί ένα σύστημα που θα αυξάνει την αντοχή και τη στιβαρότητα των ασυνεχειών για τη σταθεροποίησή της. Αντίθετα, εάν η αντοχή της βραχομάζας είναι μειωμένη σε σημείο που να συγκλίνουν τα τοιχώματα της ανεπένδυτης εκσκαφής, είναι πιθανό να απαιτείται μία πίεση αντιστήριξης που θα παρέχεται από μια δομική επένδυση. Τα συστήματα άμεσης επιλογής της υποστήριξης, όπως το RMR και το Q, συνιστάται από την BTS-ICE (2004) να χρησιμοποιούνται μόνον όταν η αντοχή της βραχομάζας υπερβαίνει επαρκώς τις τάσεις φόρτισής της. Διαφορετικά η βραχομάζα πρέπει να αντιμετωπίζεται ως συνεχής και τα μέτρα υποστήριξης να διαστασιολογούνται με στατικούς υπολογισμούς. Επίσης, μερικοί τύποι βραχομάζας, για παράδειγμα οι σχιστόλιθοι, είναι εμφανώς ανισότροποι και υφίστανται μη υδροστατικό πεδίο φόρτισης. Σε τέτοιες περιπτώσεις είναι χρήσιμος ο προσδιορισμός των επί τόπου τάσεων σε τρεις διευθύνσεις.

3.1.2.3 Εξόρυξη

Τα πετρώματα, σύμφωνα με το συμβατικό τους προσδιορισμό, εκσκάπτονταν με χρήση εκρηκτικών. Εντούτοις, η ανάπτυξη σύγχρονων μηχανών κοπής του πετρώματος επέτρεψε την αποτελεσματική μηχανική εκσκαφή τους. Η επιλογή της μεθόδου εκσκαφής των πετρωμάτων μπορεί να βασιστεί αρχικά στην αντοχή και τον τεκτονισμό τους, όπως για παράδειγμα φαίνεται στα δύο διαγράμματα στο Σχήμα 3-1.



(α) Franklin et al., 1971 *(β) Pettifer and Fookes, 1994*

Σχήμα 3-1 Ταξινόμηση της εξορυξιμότητας πετρώματος με βάση τους δείκτες σημειακής φόρτισης (I_s) και ασυνέχειας (I_f)

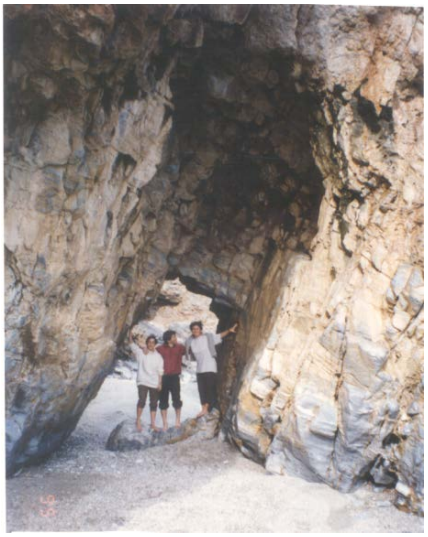
3.1.2.4 Υπερεκσκαφή

Στη βραχομάζα η επιφάνεια εκσκαφής δεν μπορεί να ακολουθήσει αυστηρά την επιφάνεια που ορίζει η μελέτη διάνοιξης. Ο βαθμός υπερεκσκαφής, εφόσον η διάνοιξη πραγματοποιείται με επιμέλεια, εξαρτάται κυρίως από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ασυνεχειών της. Στο Σχήμα 3-2, φαίνονται οι καταπτώσεις φυσικά

ανυποστήρικτων ανοιγμάτων σε διαστρωμένο ασβεστόλιθο, με στρώση παραοριζόντια και παρακατακόρυφη. Η υπερεκσκαφή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-3 (α), διαφοροποιείται με την πυκνότητα και εμμονή των ασυνεχειών. Συμβατικά επομένως η σήραγγα θα πρέπει να εκσκάπτεται μεταξύ ενός ελάχιστου ορίου που εξασφαλίζει την προβλεπόμενη ωφέλιμη διατομή, και ενός μέγιστου που κατασκευαστικά δεν δύναται εύκολα να αποφευχθεί. Τα όρια αυτά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-3 (β), ορίζονται από τις χαρακτηριστικές γραμμές "Α" και "Β" της διατομής της σήραγγας, που είναι ενδεχόμενο να διαφοροποιούνται κατά την εφαρμογή αναλόγως των επικρατουσών γεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών, και της μεθόδου εκσκαφής.

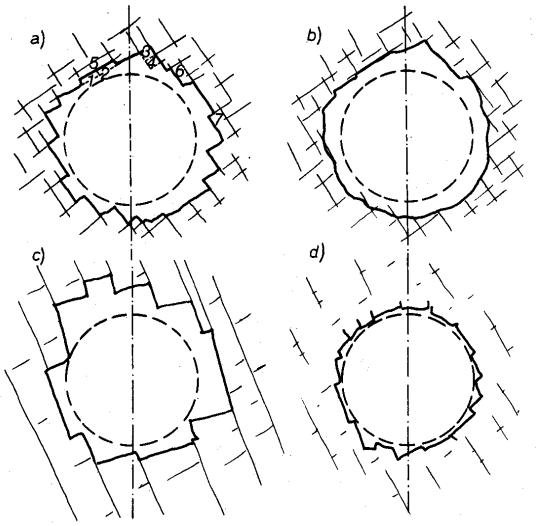


(α) Παραοριζόντια στρώση

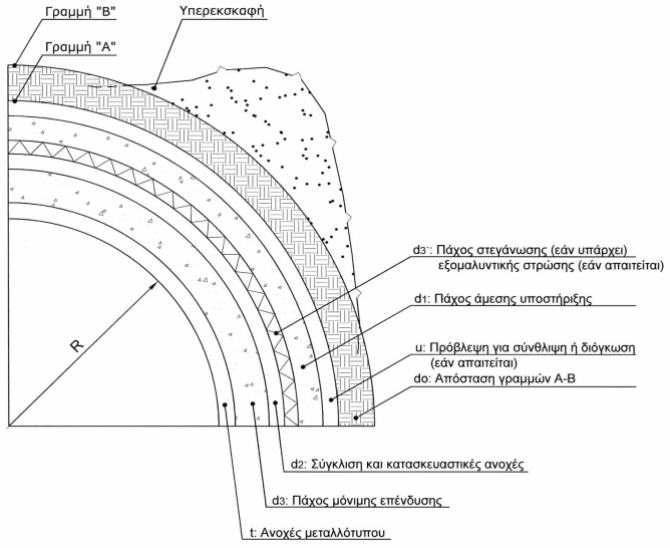


(β) Παρακατακόρυφη στρώση

Σχήμα 3-2. Υπερεκσκαφή σχετιζόμενη με τη στρώση του πετρώματος



(α) Υπερεκσκαφή εξαρτώμενη από την πυκνότητα και την εμμονή των ασυνεχειών



(β) Γραμμή Ελαχίστης Απαιτούμενης Εκσκαφής «Α» και Γραμμής Μέγιστης Αποδεκτής Εκσκαφής «Β» (ΠΕΤΕΠ, 12 02 01 01, 2005)

Σχήμα 3-3. Ελάχιστη και μέγιστη εκσκαφή του πετρώματος

Η Γραμμή Ελάχιστης Απαιτούμενης Εκσκαφής "Α" είναι η γραμμή που, καθορίζει την θέση μέσα από την οποία (δηλαδή προς το εσωτερικό της διατομής) δεν επιτρέπεται η παραμονή μη εκσκαφθέντος τμήματος της βραχομάζας, οποιουδήποτε είδους και διαστάσεων. Οι θεωρητικές ακτίνες, που καθορίζουν σε κάθε θέση των διατομών της σήραγγας την Γραμμή "Α", περιλαμβάνουν: (α) την ακτίνα R της διατομής χρήσης που είναι τέτοια ώστε να εξυπηρετείται πλήρως η λειτουργικότητα του έργου, (β) το στατικώς απαιτούμενο πάχος d_3 της μόνιμης επένδυσης, (γ) το πάχος d_3' της στεγάνωσης (εάν υπάρχει) και της αναγκαίας εξομαλυντικής στρώσης για κάλυψη ανωμαλιών ή προεξοχών κεφαλών αγκυρίων αν υπάρχουν, (δ) το στατικώς απαιτούμενο πάχος d_1 της άμεσης υποστήριξης, (ε) το πάχος d_2 για την προβλεπόμενη σύγκλιση της υποστηριγμένης διατομής καθώς

και περιθώριο για κατασκευαστικές ανοχές ˙ οι κατασκευαστικές ανοχές εξαρτώνται από την διάμετρο και το πάχος της μόνιμης επένδυσης και εν γένει δεν υπερβαίνουν τα 3 cm, (ς) πάχος u για την προβλεπόμενη μετακίνηση της περιβάλλουσας την διατομή γεωμάζας εξαιτίας υψηλού δυναμικού σύνθλιψης ή διόγκωσής του (εφόσον τέτοιο θέμα υφίσταται), στην οποία πρόβλεψη θα περιλαμβάνεται και χώρος για τυχόν αναγκαία συμπληρωματική ενίσχυση της αρχικής υποστήριξης, (ζ) τη συνολική πρόβλεψη για τις επιτρεπτές κατασκευαστικές ανοχές t του μεταλλοτύπου. Συνεπώς η θέση της γραμμής Α δίνεται από την σχέση:

$$L_A = R + d_3 + d_3' + d_1 + d_2 + u + t$$

(3-1)

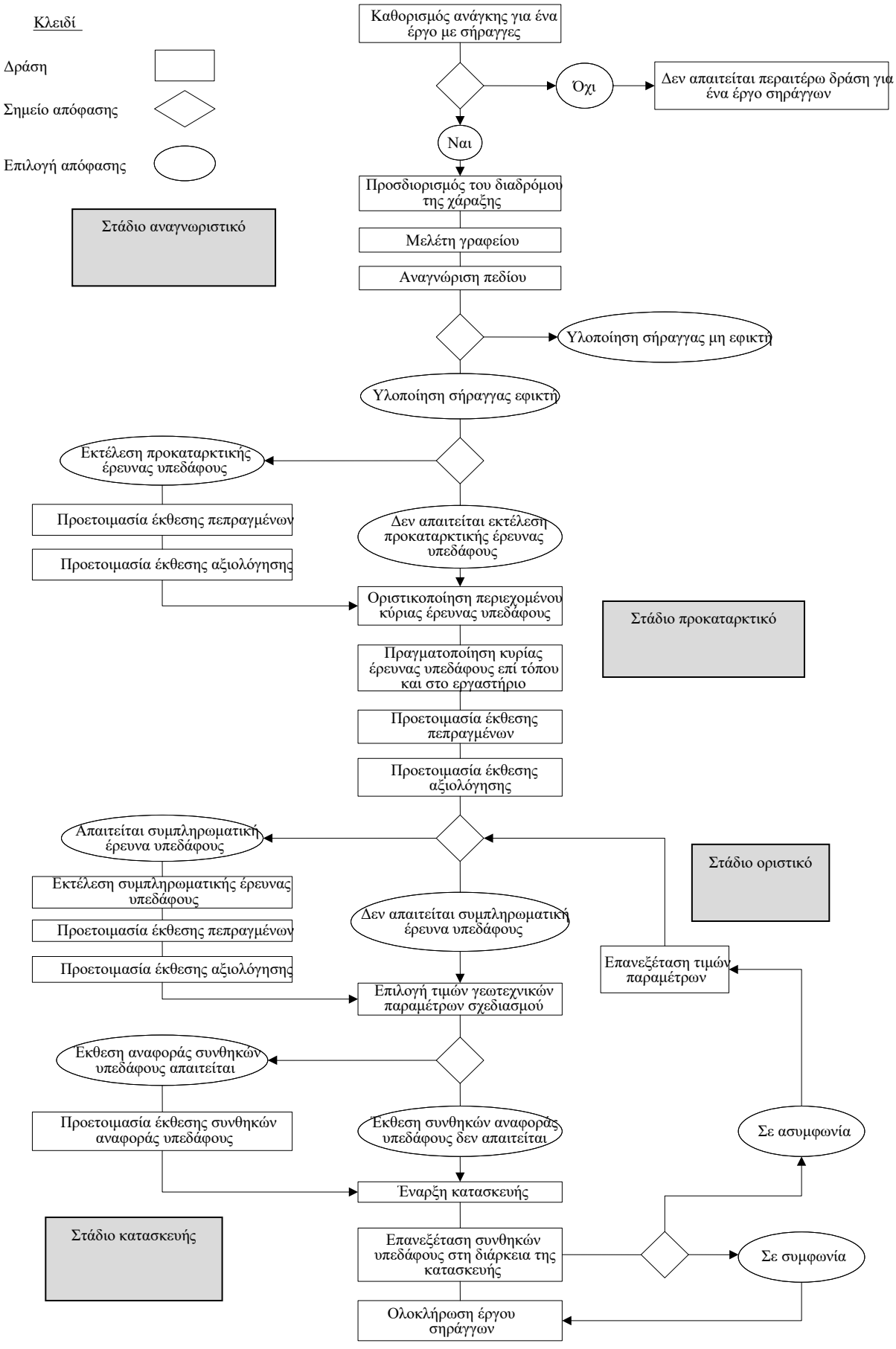
Ο έλεγχος της Γραμμής "Α" πραγματοποιείται σε οποιαδήποτε φάση της εργασίας, αλλά έχει διαφορετική θεώρηση ως προς τις προβλέψεις των μεγεθών της σύγκλισης d_2 και της μετακίνησης της περιβάλλουσας γεωμάζας u. Όταν ο έλεγχος γίνεται πριν αρχίσουν τα φαινόμενα συγκλίσεων/μετακινήσεων, υπολογίζονται ολόκληρα τα μεγέθη d_2 και u, ενώ όταν γίνεται μετά την ολοκλήρωση των συγκλίσεων/ μετακινήσεων, τα d_2 και u μηδενίζονται. Σε ενδιάμεση φάση γίνονται κατάλληλες εκτιμήσεις των μεγεθών d_2 και u με βάση τα αποτελέσματα των εκτελεσθεισών οργανομετρήσεων.

Η Γραμμή Μέγιστης Αποδεκτής Εκσκαφής "Β" είναι η γραμμή που καθορίζει το εξωτερικό όριο, μέχρι το οποίο είναι δυνατό να δικαιολογηθεί εκσκαφή. Προφανώς, η Γραμμή «Β» βρίσκεται πέραν της Γραμμής "Α". Η τυχόν εκσκαφή πέραν των ορίων της Γραμμής "Β" χαρακτηρίζεται ως «υπερεκσκαφή». Η Γραμμή "Β" απέχει από την Γραμμή "Α" απόσταση d_0 («αθέλητη υπερεκσκαφή»), η οποία καθορίζεται στην Μελέτη. Συνεπώς η θέση της γραμμής "Β" δίνεται από την σχέση:

$$L_B = L_A + d_0$$

(3-2)

Η αθέλητη υπερεκσκαφή εξαρτάται από το είδος του πετρώματος, την κατάσταση της βραχομάζας του, τον τρόπο και τα μέσα εκσκαφής και την καταβαλλόμενη προσπάθεια (προσαρμογή με δοκιμές των μεθόδων, ελεγχόμενη ανατίναξη κλπ.). Στον πυθμένα των διατομών της σήραγγας, η γραμμή "Α" ταυτίζεται με την γραμμή "Β". Στις παρειές, κατά την εκβάθυνση της σήραγγας μετά την εκσκαφή του θόλου, η αθέλητη υπερεκσκαφή d_0 μπορεί να ορίζεται στο 50% εκείνης του θόλου. Θα πρέπει να αποφεύγεται η χαλάρωση της γεωμάζας έξω από την Γραμμή "Β".



Σχήμα 3-4. Διαδικασία γεωτεχνικής διερεύνησης σηράγγων (BTS/ICE, 2004, με συμπληρώσεις)

3.2 Στάδια γεωτεχνικής διερεύνησης

3.2.1 Γενικά

Η γεωτεχνική διερεύνηση αρχίζει από την απλή αναγνώριση της περιοχής και γίνεται όλο και λεπτομερέστερη με την προχώρηση του σταδίου της μελέτης του έργου.

3.2.1.1 Λήψη πληροφοριών

Τα στάδια και οι μέθοδοι απόκτησης των γεωτεχνικών πληροφοριών για τις σήραγγες μπορούν να συνοψιστούν:

Στάδιο αναγνωριστικής μελέτης
- προσδιορισμός διαδρόμων
- μελέτη γραφείου
- αναγνώριση πεδίου
- προκαταρκτική έρευνα υπεδάφους(αν είναι απαραίτητο)

Στάδιο προμελέτης-Προκαταρκτικής μελέτης
- κύρια έρευνα υπεδάφους επί τόπου
- κύρια έρευνα υπεδάφους στο εργαστήριο
- αξιολόγηση των κύριων ευρημάτων της έρευνας υπεδάφους

Στάδιο οριστικής μελέτης
- συμπληρωματική έρευνα υπεδάφους (αν είναι απαραίτητο)
- αξιολόγηση συμπληρωματικών ευρημάτων έρευνας υπεδάφους (αν είναι απαραίτητο)
- επιλογή των τιμών των παραμέτρων γεωτεχνικού σχεδιασμού
- προετοιμασία της έκθεσης γεωτεχνικών συνθηκών αναφοράς (RGCR)

Στάδιο κατασκευής του έργου
- αναθεώρηση κατά τη διάρκεια της κατασκευής

Η πλήρης διαδικασία δίνεται ως διάγραμμα ροής στο Σχήμα 3-4, το οποίο δίνει έμφαση στην ανάγκη να λαμβάνονται αποφάσεις κατά τη διάρκεια της διαδικασίας. Πολλές πληροφορίες για την επικρατούσα τοπογραφία, γεωλογία, γεωμορφολογία, υδρολογία, υδρογεωλογία και ιστορική δραστηριότητα συνήθως υπάρχουν ήδη για τις περισσότερες περιοχές και διαδρόμους των σηράγγων. Συνήθως πάντα πραγματοποιείται μια μελέτη (β) γραφείου (βλ. π.χ. Perry & West, 1996) της διαθέσιμης βιβλιογραφίας, των χαρτών, των αεροφωτογραφιών, των υφισταμένων ερευνών υπεδάφους, κλπ,. Εντούτοις, μολονότι οι πρόσφατες τεχνολογικές πρόοδοι έχουν οδηγήσει στη διαθεσιμότητα τοπογραφικών χαρτών που ενημερώνονται συχνά, δεν υπάρχει κανένα υποκατάστατο της αναγνώρισης πεδίου (γ) του διαδρόμου ώστε να αποκτηθεί η καλύτερη αίσθηση για αυτόν και τις πιθανές θέσεις φρεάτων και εργοταξίων. Κανονικά αυτή η δραστηριότητα λαμβάνει τη μορφή περπατήματος, που παρέχει την ευκαιρία να εξεταστεί επίγεια το πέτρωμα και να επιβεβαιωθούν, ή μερικές φορές αμφισβητηθούν, η αξιοπιστία των στοιχείων της μελέτης γραφείου. Ιδιαίτερη αξία για τις αγροτικές περιοχές μπορεί να έχει η αναζήτηση στοιχείων από γεωλόγους υπαίθρου.

3.2.1.2 Καταλληλότητα μεθόδων διερεύνησης

Υπάρχει μεγάλος αριθμός δυνατών τεχνικών (Clayton *et al.* 1982) έρευνας επί τόπου και εργαστηρίου, αλλά πολλές είναι περιορισμένης εφαρμογής στη σηραγγοποιΐα. Στους παρακάτω δύο πίνακες δίνονται οι κατάλληλες τεχνικές. Ο Πίνακας 3-5 δίνει τις τεχνικές επί τόπου διερεύνησης και την εφαρμοσιμότητά τους. Οι κρουστικές δοκιμές είναι κατάλληλες για εδαφικούς σχηματισμούς σε μικρό βάθος, ήτοι για στόμια σηράγγων, αβαθείς σήραγγες, θέσεις φρεάτων κλπ. Περιστροφικές γεωτρήσεις είναι κατάλληλες για σκληρά πετρώματα σε οποιοδήποτε βάθος. Δοκιμαστικές εκσκαφές είναι κατάλληλες για σκληρά ή μαλακά πετρώματα σε μικρό κυρίως βάθος σήραγγας. Τέλος οι γεωφυσικές διασκοπίσεις είναι γενικά κατάλληλες για μικρά βάθη. Για μεσαία και μεγάλα βάθη κατάλληλες είναι οι δοκιμές σεισμικής ανάκλασης, ενώ για ενδιάμεσα βάθη μικρή εφαρμογή βρίσκουν και οι δοκιμές μεταξύ γεωτρήσεων.

Πίνακας 3-5. Τεχνικές γεωτεχνικής διερεύνησης

Διερεύνηση	**Σε επαφή με την επιφάνεια**			**Βάθος τμήματος σήραγγας**		
	Στόμιο	**Εργοτάξιο**	**Φρέαρ**	**Μικρό**	**Μέσο**	**Μεγάλο**
<u>Κρουστική</u>						
Διασκοπήσεις SPT	Π	Π	Π	Π		
Διείσδυση κώνου CPT	Π	Π	Π	Π		
<u>Περιστροφική γεώτρηση</u>						
Με κρούση	Π		Π	Π	Π	Π
Ανοικτού διατρήματος	Π		Π	Π	Π	Π
Κατακόρυφη πυρηνοληψία	Π	Π	Π	Π	Π	Π
Προσανατολισμένη δειγματοληψία	Π		Π	Π	Π	Π
<u>Δοκιμαστική εκσκαφή</u>						
Τάφρος	Π	Π	Π			
Φρέαρ	Μ		Π	Π	Μ	Μ
Στοά	Π			Π	Μ	Μ
<u>Γεωφυσική</u>						
Γεωραντάρ	Μ	Μ	Μ			
Ηλεκτρικής αντίστασης	Π	Π	Π	Π	Μ	
Σεισμικής διάθλασης	Π		Μ	Π	Μ	
Σεισμικής ανάκλασης			Μ	Μ	Π	Π
Σεισμική μεταξύ γεωτρήσεων					Μ	Μ

Π: Πλήρους εφαρμογής, Μ: Εφαρμόσιμη σε μερικούς τύπους πετρωμάτων ή συνθήκες έργου

Ο Πίνακας 3-6 αναφέρει τις εργαστηριακές δοκιμές, που δυνητικά εκτελούνται κατά το σχεδιασμό των σηράγγων, σε εδάφη και πετρώματα, μαζί με τις παραμέτρους που αποκτώνται.

Πίνακας 3-6. Γεωτεχνικές εργαστηριακές δοκιμές στη σηραγγοποιία

Δοκιμή	Παράμετροι	Σύμ-βολο	Συνήθης εφαρμογή					Χρήση στις σήραγγες
			Έδαφος			Πέτρωμα		
			Συνε-κτικό	Κοκκ ώδες	Μι-κτό	Ασθε νές	Ισχυ-ρό	
Πυκνότητα	Φαινόμενο βάρος	ρ ρ΄	v		v	v	v	Υπερκείμενο φορτίο
Μέγιστη και ελάχιστη πυκνότητα	Μέγιστη και ελάχιστη πυκνότητα	ρ_{max} ρ_{min}		v				Υπερκείμενο φορτίο
Φυσική υγρασία	Περιεκτικότητα σε νερό	w	v	v	v	v		Τύπος - κατάσταση εδάφους
Ειδικό βάρος	Ειδικό βάρος	G_s	v	v	v	v	v	Υπερκείμενο φορτίο
Πλαστικότητα	Όρια και δείκτες υδαρότητας και πλαστικότητας	LL, PL PI, LI	v		v			Τύπος και κατάσταση του εδάφους
Κοκκομετρική διαβάθμιση	Κοκκομετρική διαβάθμιση		v	v	v			Τύπος εδάφους
Μονοαξονική αντοχή	Μονοαξονική αντοχή	q_u				v	v	Αντοχή πετρώματος
Σημειακή φόρτιση	Δείκτης σημειακής φόρτισης και μονοαξονική αντοχή	I_p, q_u				v	v	Αντοχή πετρώματος
UU ή CU	Αστράγγιστη διατμητική αντοχή	C_u, S_u	v		v	v		Αντοχή
CD ή CUPP	Ενεργές διατμητικής αντοχής	c΄, φ΄				v		Αντοχή εδάφους
Άμεση διάτμηση	Γωνία διατμητικής αντοχής	φ, φ΄		v	v	v	v	Διατμητική αντοχή κόκκων εδάφους ή διακλάσεων
Στερεοποίηση οιδημέτρου	Συντελεστής συμπιεστότητας/ μονοαξονικό στραγγιζόμενο μέτρο παραμόρφωσης	m_v, E'_v	v					Συμπιεστότητα εδάφους
Διαπερατότητα	Συντελεστής διαπερατότητας	K		v	v			Διαπερατότητα εδάφους
Λόγος Poisson	Λόγος Poisson	ν				v	v	Παραμορφωσιμότητα πετρώματος
Χημικές αναλύσεις	pH	pH	v	v	v	v		Ανθεκτικότητα επένδυσης
	Περιεκτικότητα σε θειικά	$S0_3$						
	σε χλωριόντα	Cl						
	Χημική μόλυνση		v	v	v	v	v	
Λειαντικότητας							v	Εκσκαψιμότητα
Χαλάρωσης						v	v	Ευαισθησία σε χαλάρωση

Μολονότι υπάρχουν κάποιες συγκεκριμένες δοκιμές εργαστηριακής ή επί τόπου διερεύνησης του υπεδάφους, άμεσα σχετικές με τα έργα σηράγγων, οι μέθοδοι που επιλέγονται και το πεδίο εφαρμογής τους καθορίζονται από ειδικούς παράγοντες του έργου. Βάση του σχεδιασμού μιας γεωτεχνικής διερεύνησης αποτελεί η γνώση του τι αναζητείται από αυτή (Glossop, 1968). Με αυτό συνδέεται η στρατηγική για την

έρευνα υπεδάφους που καθορίζεται από το σκοπό κάθε μίας διερευνητικής γεώτρησης εδαφικού δείγματος ή πυρήνα πετρώματος, επί τόπου ή εργαστηριακής δοκιμής. Αυτή πρέπει να εξασφαλίζει το βέλτιστο κέρδος για τα χρήματα που δαπανώνται. Κατά τη διάρκεια λήψης των πληροφοριών η στρατηγική μπορεί να αλλάξει και το πρόγραμμα να μεταβληθεί κατάλληλα. Ένα πρόγραμμα γεωτεχνικής διερεύνησης εκτελούμενο σε φάσεις επωφελείται από αυτές τις αρχές. Τα συμπεράσματα μιας προκαταρκτικής έρευνας επιτρέπουν στην κύρια έρευνα να προσαρμοστεί καλύτερα στο αναμενόμενο έδαφος και στα υπόγεια νερά, ενώ μια συμπληρωματική διερεύνηση μπορεί να προγραμματιστεί για να διαλευκάνει αμφιβολίες και κενά γνώσης που παρέμειναν μετά από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της κύριας διερεύνησης. Αφ' ετέρου, γεωτρήσεις προηγούμενης φάσης μπορούν, οικονομικά, να εξυπηρετήσουν τους σκοπούς μιας επόμενης φάσης όπως, παραδείγματος χάριν, την εγκατάσταση πιεζομέτρων. Αναγνωρίζοντας ότι κάθε συνδυασμός έργου και περιοχής είναι μοναδικός, δεν υπάρχει κανένα σύνολο κανόνων που μπορεί να εφαρμοστεί απαρέγκλιτα σε κάθε περίπτωση. Κατά την επιλογή λαμβάνονται υπόψη:

- ο χαρακτήρας και η μεταβλητότητα του εδάφους
- η φύση του έργου
- η ανάγκη και το πεδίο εφαρμογής μιας προκαταρκτικής διερεύνησης
- η θέση των διερευνητικών οπών (γεωτρήσεων, στοών, κλπ)
- το διάστημα των διερευνητικών οπών
- το βάθος της διερεύνησης
- η ενδεχόμενη μόλυνση υπεδάφους.

Οι γεωτρήσεις πρέπει να βρίσκονται εκτός της χάραξης των σηράγγων έτσι ώστε να μη παρεμβάλλονται με την κατασκευή που θα ακολουθήσει και πρέπει πάντα να σφραγίζονται με υδατοστεγανά υλικά. Επίσης, είναι σημαντικό οι γεωτρήσεις να φθάνουν σε επαρκές βάθος κάτω από τη στάθμη του ανάστροφου, τόσον επειδή οι επόμενες αλλαγές στο σχεδιασμό μπορεί να απαιτήσουν χαμήλωμα της χάραξης, όσον και επειδή η ζώνη επιρροής της σήραγγας μπορεί να επεκταθεί, από τη φύση του εδάφους, σε μεγαλύτερο βάθος.

3.2.1.3 Προσδιορισμός υπόγειων νερών

Το καθεστώς των υπόγειων νερών πρέπει να διερευνάται εξαρχής. Κατά τη διάρκεια του σταδίου μελέτης γραφείου ερευνώνται όλα τα διαθέσιμα αρχεία πηγών, υδρογεωλογικοί χάρτες και οποιεσδήποτε άλλες σχετικές πληροφορίες. Λόγω των πρακτικών δυσκολιών ακριβούς μέτρησης της στάθμης των υπόγειων νερών από τις γεωτρήσεις της διερεύνησης του υπεδάφους, εγκαθίστανται κατακόρυφοι σωλήνες ή/και πιεζόμετρα για να καταγράψουν στάθμες ισορροπίας. Αυτές οι συσκευές επιτρέπουν και την παρακολούθηση της στάθμης για σημαντικό χρόνο έτσι ώστε να μετρώνται οι αλλαγές με τις εποχές και τις καιρικές συνθήκες. Η επίδραση των υπόγειων νερών διαφέρει για τα εδάφη και τους βράχους. Στα εδάφη και τα διακλασμένα πετρώματα ισχύει η αρχή των ενεργών τάσεων. Τα υπόγεια νερά θα διεισδύουν στις διακλάσεις (ανάλογα με το υλικό γόμωσης), στις σχισμές και σε άλλες ασυνέχειες με αποτέλεσμα την ανάπτυξη υδροστατικών πιέσεων και ενδεχομένως ισχυρών εισροών στις εκσκαφές. Μερικοί τύποι εδαφών είναι ευαίσθητοι στην επαφή με το νερό στην επιφάνεια εκσκαφής και μπορούν να εξασθενήσουν σημαντικά. Τα παραδείγματα περιλαμβάνουν λεπτόκοκκα εδάφη και βράχους (άργιλοι, σχιστόλιθοι, πηλίτες) που είναι ή μπορούν εύκολα να γίνουν πηλός, ιλύες και λεπτές άμμοι και να εμφανίσουν συνθήκες κατάρρευσης, καθώς και ορισμένους αλατούχους σχηματισμούς που διαλύονται. Υπάρχει επίσης ενδεχόμενο αναβρασμού ως αποτέλεσμα μιας τοπικής αύξησης στη βαθμίδα πίεσης του νερού.

Ο χημικός και φυσικός χαρακτήρας των υπόγειων νερών μπορεί να επιδράσει στη μελέτη της επένδυσης, καθώς μπορεί να έχει επιπτώσεις στην ανθεκτικότητά της. Σε εξαιρετικές περιστάσεις μπορεί να πρέπει να δοθεί προσοχή στις θερμοκρασίες των υπόγειων νερών.

Ως αναπόσπαστο τμήμα του πλήρους γεωτεχνικού προτύπου σε όλο το διάδρομο των σηράγγων πρέπει να αναφέρεται το καθεστώς των υπόγειων νερών που συμπεριλαμβάνει τη στάθμη του φρεατίου ορίζοντα, τις τομές πίεσης-βάθους υπόγειων νερών (υδροστατικής ή υδροδυναμικής), τις αναμενόμενες ανυψώσεις της στάθμης των υπόγειων νερών και τις αρτεσιανές συνθήκες,. Κατά τη διάρκεια της κατασκευής πρέπει να πραγματοποιούνται παρατηρήσεις των πραγματικών συνθηκών των υπόγειων νερών για τον έλεγχο της ισχύος των προβλέψεων, όπου αυτές είναι κρίσιμες για τη μελέτη. Τέτοιες παρατηρήσεις περιλαμβάνουν την παρακολούθηση των εισροών στις υπόγειες εκσκαφές, σημειώνοντας τις παροχές από οποιεσδήποτε

διαδικασίες προσωρινού υποβιβασμού της στάθμης των υπόγειων νερών γύρω από τη ζώνη εκσκαφής, και από διερευνητικές γεωτρήσεις που εκτελούνται μπροστά από το μέτωπο των σηράγγων. Εάν υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των υποθέσεων της μελέτης και των πραγματικών συνθηκών, τότε η μελέτη της διάνοιξης πρέπει να αναθεωρείται.

3.2.2 Απαιτούμενες γεωλογικές και γεωτεχνικές μελέτες και έρευνες στην περιοχή σηράγγων οδοποιίας

Οι αναγκαίες γεωλογικές και γεωτεχνικές μελέτες και έρευνες στα πλαίσια της εκπόνησης μελέτης σήραγγας κατανέμονται στα παρακάτω τρία στάδια της μελέτης οδοποιίας (Σακκάς κ.α., 2002). Αντίστοιχες απαιτήσεις υπάρχουν και για άλλου σκοπού σήραγγες.

3.2.2.1 Αναγνωριστική μελέτη οδοποιίας

Στο στάδιο της αναγνωριστικής μελέτης οδοποιίας όταν στις προτεινόμενες εναλλακτικές χαράξεις περιλαμβάνεται και σήραγγα, εκπονούνται γεωλογικές και γεωτεχνικές έρευνες και μελέτες στην περιοχή της σήραγγας. Στόχος της γεωλογικής και γεωτεχνικής διερεύνησης είναι να εξασφαλίσει την εφικτότητα των προτεινόμενων εναλλακτικών χαράξεων με ταυτόχρονη τεκμηρίωση της βέλτιστης τεχνικοοικονομικής λύσης εντοπίζοντας παράλληλα τους πιθανούς κινδύνους.

3.2.2.2 Γεωλογικά στοιχεία

α. Συγκέντρωση και αξιολόγηση όλων των υφισταμένων στοιχείων. Αξιολόγηση αεροφωτογραφιών σε κατάλληλη κλίμακα.

β. Εκπόνηση διεξοδικής γεωλογικής αναγνώρισης στην ευρύτερη περιοχή της σήραγγας.

γ. Γεωλογική χαρτογράφηση και σύνταξη γεωλογικού χάρτη σε κλίμακα 1:5000. Το συνολικό εύρος εξαρτάται από την μορφολογία του ανάγλυφου (πεδινή ή ορεινή περιοχή) και εκτείνεται σε 1 km. περίπου σε πεδινά τμήματα, ενώ σε περιοχές με έντονο μορφολογικό ανάγλυφο μπορεί να είναι μεγαλύτερο μετά από αιτιολογημένη πρόταση του μελετητή και έγκριση του εργοδότη. Η χαρτογράφηση εκτείνεται σε μήκος 500 μέτρων από πιθανολογούμενα στόμια.

δ. Σύνταξη γεωλογικών μηκοτομών στην κλίμακα της γεωλογικής χαρτογράφησης.

ε. Σύνταξη γεωλογικών εγκάρσιων τομών στην κλίμακα της γεωλογικής χαρτογράφησης, σε χαρακτηριστικές θέσεις τεχνικού και γεωλογικού ενδιαφέροντος και στις θέσεις των γεωτρήσεων (προηγούμενων ή αυτών της παρούσας φάσης μελέτης).

ς. Χάρτης τεχνικής γεωμορφολογίας και προβληματικών περιοχών που καλύπτει όλη την παραπάνω έκταση της γεωλογικής χαρτογράφησης και στην ίδια κλίμακα.

ζ. Απογραφή όλων των σημείων εμφάνισης υπόγειου νερού και μετρήσεις στάθμης ή παροχών πηγών και καταγραφή σε ειδικά δελτία.

η. Καταγραφή σε ειδικά απογραφικά δελτία των υφιστάμενων πρανών στην ευρύτερη περιοχή της χάραξης με στόχο την διερεύνηση των συνθηκών της ευστάθειας τους. Τα στοιχεία της καταγραφής αποτελούν τη βάση για την γεωτεχνική αξιολόγηση και γεωτεχνικούς υπολογισμούς ανάδρομων αναλύσεων ευστάθειας πρανών.

θ. Τεχνική περιγραφή ασυνεχειών και καταγραφή σε ειδικά απογραφικά δελτία. Σύνταξη τεκτονικών διαγραμμάτων σε αντιπροσωπευτικές θέσεις.

η. Τεχνική περιγραφή γεωυλικών και καταγραφή σε ειδικά απογραφικά δελτία.

θ. Τεχνική γεωλογική έκθεση στην οποία περιλαμβάνεται και κατάλογος αναμενόμενων κινδύνων.

3.2.2.3 Γεωτεχνικά στοιχεία

α. Εκτέλεση περιορισμένου προγράμματος γεωερευνητικών εργασιών που θα παρέχει τα αναγκαία στοιχεία και πληροφορίες στα πλαίσια κυρίως της γεωλογικής μελέτης.

β. Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων αυτού του περιορισμένου ερευνητικού προγράμματος σε συνδυασμό και με την γεωλογική διερεύνηση και πρόταση για το αντίστοιχο πρόγραμμα του σταδίου της προκαταρκτικής μελέτης σήραγγας.

3.2.2.4 Προμελέτη οδοποιίας - Προκαταρκτική μελέτη σήραγγας

3.2.2.5 Γεωλογικά στοιχεία

Στόχος της γεωλογικής μελέτης είναι η συγκέντρωση, καταγραφή, ανάλυση και σύνθεση όλων των στοιχείων που είναι απαραίτητα για την δόμηση του γεωλογικού προτύπου της περιοχής διέλευσης της σήραγγας, με την επιστημονικά και οικονομικά επιτυχή προσομοίωση των επικρατουσών γεωλογικών συνθηκών. Τα γεωλογικά στοιχεία που απαιτούνται στην προκαταρκτική μελέτη της σήραγγας, η οποία συντάσσεται από τον γεωλόγο μελετητή της ομάδας μελέτης, είναι:

- Συγκέντρωση και αξιολόγηση όλων των υφισταμένων στοιχείων.
- Γεωλογική χαρτογράφηση της ευρύτερης περιοχής διέλευσης της σήραγγας σε κλίμακα 1:2000 ή μεγαλύτερη. Στις περιοχές στομίων του υπογείου έργου η χαρτογράφηση γίνεται σε κλίμακα 1:500 ή μεγαλύτερη. Το εύρος της χαρτογράφησης δεν πρέπει να είναι μικρότερο των 500 μέτρων εκατέρωθεν του άξονα, ενώ εκτείνεται και κατά 500 μέτρα τουλάχιστον από τις θέσεις των στομίων. Ως τοπογραφικό υπόβαθρο για την διενέργεια της γεωλογικής χαρτογράφησης εκτός περιοχής στομίων είναι δυνατή η αναπαραγωγή των σχετικών διαγραμμάτων από τα ψηφιακά διατιθέμενα της κλίμακας 1:5000.
- Γεωλογική μηκοτομή στην ίδια κλίμακα. Παραμόρφωση υψών γίνεται αποδεκτή μόνο μετά από αιτιολογημένη πρόταση του μελετητή και αποδοχή του εργοδότη.
- Εγκάρσιες γεωλογικές τομές και διατομές στις θέσεις των στομίων και σε επιλεγμένες θέσεις οπωσδήποτε δε στις θέσεις των γεωτρήσεων σε κατάλληλη κλίμακα.
- Τεχνική περιγραφή ασυνεχειών και σύνταξη σχετικών τεκτονικών διαγραμμάτων. Μικροτεκτονικές αναλύσεις και δυνητικές αστοχίες.
- Καταγραφή σημείων εμφάνισης νερού, συσχετισμός αυτών με τις καταγραφές του προηγούμενου σταδίου της μελέτης, συνέχιση μετρήσεων.
- Καταγραφή και επεξεργασία όλων των στοιχείων των γεωερευνητικών εργασιών.
- Καταγραφή των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών και σύνδεση τους με την κατασκευή και λειτουργία του υπόγειου έργου. Οριζοντιογραφία σε κλίμακα 1:2000 ή μεγαλύτερη που θα περιλαμβάνει γεωμορφολογικά στοιχεία και κυρίως αυτά που είναι σε δυναμική εξέλιξη όπως διαβρώσεις, ασταθείς δομές και ο βαθμός επικινδυνότητας αυτών, τις καταγραφές πληροφοριών στα γεωμορφολογικά δυναμικά χαρακτηριστικά, τύπους ασταθών δομών και βαθμό ενεργότητας.
- Βοηθητικούς θεματικούς χάρτες (υδρογεωλογικός, τεκτονικός, καταγραφής γεωερευνητικών εργασιών, αποθεσιοθαλάμων κ.λ.π.).
- Δόμηση του γεωλογικού προτύπου της περιοχής διέλευσης της σήραγγας.

Όλα τα ανωτέρω στοιχεία συγκεντρώνονται, καταγράφονται, επεξεργάζονται και παρουσιάζονται σύμφωνα με τις διαδικασίες που περιγράφονται στις Οδηγίες για την σύνταξη γεωλογικών μελετών. Κατά την σύνταξη της γεωλογικής μελέτης συνεκτιμώνται και τα στοιχεία και αποτελέσματα που προκύπτουν από τις γεωτεχνικές έρευνες. Η τεχνική γεωλογική έκθεση συμπεριλαμβάνεται στην Έκθεση γεωλογικής και γεωτεχνικής αξιολόγησης της Μελέτης.

3.2.2.6 Γεωτεχνικά στοιχεία - αποτελέσματα γεωερευνητικών εργασιών

Οι γεωερευνητικές εργασίες εκτελούνται μετά από πρόταση του μελετητή και την έγκριση του εργοδότη. Η εκτέλεση όλων των εργασιών του γεωερευνητικού προγράμματος, η συγκέντρωση και παρουσίαση των αποτελεσμάτων εργασιών, ερευνών και δοκιμών γίνεται σύμφωνα με τις διαδικασίες που περιγράφονται στις Οδηγίες για την σύνταξη Γεωλογικών και Γεωτεχνικών Μελετών. Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των γεωερευνητικών εργασιών αποτελεί αντικείμενο της έκθεσης Γεωλογικής και Γεωτεχνικής αξιολόγησης της μελέτης.

3.2.2.7 Οριστική μελέτη οδοποιίας - Οριστική μελέτη σήραγγας

3.2.2.8 Γεωλογικά στοιχεία

Στόχος της γεωλογικής μελέτης στο στάδιο αυτό είναι αποκλειστικά η ενσωμάτωση (με τους ίδιους όρους και απαιτήσεις όπως παραπάνω) στα γεωλογικά στοιχεία της προκαταρκτικής μελέτης τυχόν νέων στοιχείων που προσδιορίζονται στο οικείο άρθρο.

3.2.2.9 Συμπληρωματικά γεωτεχνικά στοιχεία - γεωερευνητικά αποτελέσματα

Οι γεωερευνητικές εργασίες εκτελούνται, μετά από πρόταση του μελετητή και έγκριση του εργοδότη. Η εκτέλεση του προγράμματος γεωερευνητικών εργασιών, η συγκέντρωση και παρουσίαση των αποτελεσμάτων εργασιών, ερευνών και δοκιμών γίνεται σύμφωνα με τις διαδικασίες που περιγράφονται στις Οδηγίες για την σύνταξη γεωλογικών και γεωτεχνικών μελετών. Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των γεωερευνητικών εργασιών αποτελεί αντικείμενο της έκθεσης Γεωτεχνικής Αξιολόγησης.

3.3 Αξιολόγηση συνθηκών και παράμετροι υπολογισμών

3.3.1 Αξιολόγηση γεωτεχνικής έρευνας

Η αξιολόγηση των στοιχείων της γεωτεχνικής έρευνας, διαμορφώνει τη σύνδεση των πληροφοριών που προκύπτουν από τις μελέτες γραφείου, την εργαστηριακή και επί τόπου έρευνα, με την έναρξη της μελέτης της σήραγγας.

3.3.1.1 Περιεχόμενα αξιολόγησης

Το Βρετανικό πρότυπο BS 5930: 1999, όπως και οι ΚΜΕ, καθορίζουν, το γενικό περιεχόμενο μιας γεωτεχνικής έκθεσης πεπραγμένων (GFR). Η αξιολόγηση περιλαμβάνει τον καθορισμό, την περιγραφή και την ποσοτικοποίηση της γεωμάζας σε μια μορφή που να είναι σχετική και εύχρηστη για τη μελέτη των σηράγγων. Αυτές οι πληροφορίες παρέχονται συνήθως υπό μορφή έκθεσης γεωτεχνικής αξιολόγησης (GIR). Αυτή μπορεί να προετοιμαστεί πλήρως μόλις ολοκληρωθεί η GFR, που περιέχει όλα τα ευρήματα των εργασιών στο εργαστήριο και επί τόπου. Χαρακτηριστικά η GIR θα περιέχει τις εξής ενότητες:

- γενική περίληψη
- εισαγωγή
- περιγραφή του προτεινόμενου έργου
- καθορισμός του διαδρόμου της διαδρομής
- ευρήματα της μελέτης γραφείου και της αναγνώρισης πεδίου
- προσδιορισμός των επιλογών διαδρομής και χάραξης
- περίληψη των εργασιών της γεωτεχνικής έρευνας
- περιγραφή των συνθηκών της γεωμάζας των υπόγειων νερών
- αξιολόγηση των γεωτεχνικών συνθηκών σε σχέση με τη μελέτη και την κατασκευή του προτεινόμενου έργου
- συστάσεις για μελέτη και κατασκευή, καθώς και για περαιτέρω γεωτεχνικές έρευνες
- συμπεράσματα

Μία GIR μπορεί, και πρέπει, να προετοιμάζεται σε κάθε φάση γεωτεχνικής έρευνας. Η ονομασία Συνοπτική Έκθεση Γεωτεχνικής Μελέτης (GDSR) χρησιμοποιείται περιστασιακά, για την έκθεση που περιέχει τις απαραίτητες παραμέτρους της γεωτεχνικής μελέτης. Εντούτοις, αναμένεται ότι η GIR θα πρέπει να περιλαμβάνει τις πληροφορίες αυτές. Η GFR και η GIR αποτελούν τη βάση για τη Γεωτεχνική Έκθεση Αναφοράς (GBR), όπου απαιτείται. Εντούτοις, η GBR (Essex, 1997) εξυπηρετεί ένα διαφορετικό σκοπό και πρέπει να είναι ένα εξ ολοκλήρου χωριστό έγγραφο. Η GBR παρέχει τις γεωτεχνικές συνθήκες αναφοράς για τη σύμβαση των σηράγγων, και πρέπει να παρέχεται σε όλα τα συμβαλλόμενα μέρη του έργου. Αντίθετα, η GIR προετοιμάζεται για να χρησιμεύσει στη μελέτη της σήραγγας.

3.3.1.2 Διακριτή συμπεριφορά γεωμάζας

Υπάρχει μια συνεχής μετάβαση από το μαλακότερο, χαλαρότερο ή ασταθέστερο έδαφος, μέσω του πυκνού εδάφους, στο ασθενές ή κερματισμένο πέτρωμα και μετά στο ισχυρό συμπαγές πέτρωμα. Εντούτοις, αποτελεί παράδοση στη σηραγγοποιία η διάκριση της γεωμάζας που διανοίγεται, σε "εδαφική- μαλακή" και σε "βραχώδη- σκληρή", ανεξάρτητα από αυτήν τη μεταβατικότητα. Θεμελιώδεις αποφάσεις, παραδείγματος χάριν για τον τύπο της επένδυσης ή της μηχανής διάτρησης (TBM), από τους μελετητές και τους αναδόχους κατασκευής των σηράγγων, βασίζονται στη διάκριση μεταξύ "εδαφικής-μαλακής" και "βραχώδους-σκληρής" γεωμάζας, μολονότι οι γεωτεχνικές συνθήκες συχνά είναι πιο περίπλοκες και η διάκριση σπάνια τόσο απλή. Μιλώντας γενικά, όλοι οι τύποι εδαφών και τα ασθενή πετρώματα εμπίπτουν γενικά στην κατηγορία "μαλακή γεωμάζα". Τα ασθενή πετρώματα περιλαμβάνουν πτωχής ποιότητας κρητίδες, ασθενείς πηλίτες, και ασθενώς συγκολλημένους ή ιδιαίτερα κερματισμένους ψαμμίτες. Η "σκληρή γεωμάζα" περιλαμβάνει γενικά όλες τις άλλες μορφές πετρωμάτων.

3.3.1.3 Αξιολόγηση των υπόγειων νερών

Η προσεκτική αξιολόγηση της παρουσίας και των πιέσεων των υπόγειων νερών, και η πιθανή επιρροή τους, είναι εξαιρετικά σημαντικές στη μελέτη της διάνοιξης των σηράγγων. Τα απρόβλεπτα φαινόμενα υπόγειων νερών προκαλούν συχνά προβλήματα στην κατασκευή, που οδηγούν σε μεγάλες καθυστερήσεις και υπερβολικές αυξήσεις στο κόστος. Ακόμη και η μικρή διαρροή υπόγειων νερών στις σήραγγες μπορεί, μακροπρόθεσμα, να προκαλέσει δομική αστοχία καθώς επίσης και υποβιβασμό των υδροφόρων οριζόντων με ζημία σε τρίτους. Οι τρεις κύριες καταστάσεις όπου η διαφοροποίηση της κατάστασης των υπόγειων νερών μπορεί να έχει σημαντική επίδραση είναι όταν:

- Απαντούν υπόγεια νερά εκεί όπου δεν αναμένονται.
- Αναμένονται με άγνωστη επίδραση στη συμπεριφορά της γεωμάζας και στην προγραμματισμένη μέθοδο κατασκευής.
- Αναμένονται σε άγνωστη ποσότητα και η πραγματική ποσότητα εισροής υπερβαίνει πολύ τις εκτιμήσεις.

Η παρουσία και η φύση του καθεστώτος των υπόγειων νερών επηρεάζει τη μελέτη της διάνοιξης με τους ακόλουθους τρόπους:

Εύρος των πιέσεων. Με τη διάκριση, κατά τον σχεδιασμό, περιπτώσεων πίεσης υπόγειων νερών, τόσον στο στάδιο κατασκευής όσον και μακροπρόθεσμα.

Στεγανοποίηση. Με τον καθορισμό των απαιτήσεων για τη στεγανοποίηση των σηράγγων. Οι αποφάσεις ως προς το εάν θα χρησιμοποιηθούν παρεμβύσματα (gaskets) μεταξύ των στοιχείων (της προκατασκευασμένης επένδυσης), μεμβράνες, κ.λπ. είναι θεμελιώδεις και θα εξαρτηθούν, εκτός από τον τύπο της επένδυσης, από τις λειτουργικές ανάγκες της σήραγγας.

Επίπλευση. Με την εξασφάλιση έναντι του κίνδυνου επίπλευσης λόγω άνωσης.

Επιπτώσεις σε τρίτους. Με την εξασφάλιση αποφυγής καθίζησης θεμελίων, στερέματος πηγών ή μόλυνσης, λόγω της εισροής νερών στη σήραγγα ή εκροής από αυτή.

Επιπτώσεις του ελεύθερου νερού στο πέτρωμα. Με τον καθορισμό του εάν οι ιδιότητες του εκσκαμμένου εδάφους μπορούν να μεταβληθούν με την έκθεσή τους στο ελεύθερο νερό, παραδείγματος χάριν με το μαλάκωμα, τη διόγκωση (π.χ. ανυδρίτης), την ανάπτυξη αστάθειας, τη διάλυση ή την απόπλυση.

Στράγγιση. Με την επιλογή κατάλληλου συστήματος στράγγισης της σήραγγας στη φάση λειτουργίας, που αντιμετωπίζει τις μακροχρόνιες εισροές υπόγειων νερών εφόσον αναμένονται.

Κατά τις φάσεις μελέτης και κατασκευής, έχει μεγάλη σημασία να μην αγνοούνται οι συνθήκες υπόγειου νερού και οι διατάξεις ελέγχου του στην αξιολόγηση του κινδύνου.

3.3.1.4 Βελτίωση υπεδάφους και έλεγχος υπόγειων νερών

Εφόσον οι συνθήκες της γεωμάζας αξιολογούνται ότι δεν επιτρέπουν ή δυσχεραίνουν τη διάνοιξη, απαιτείται η τροποποίησή τους με διάφορες τεχνικές βελτίωσης και ελέγχου.

3.3.1.5 Αλλαγές στη στάθμη νερού

Ο υποβιβασμός της στάθμης των υπόγειων νερών επιφέρει μια γενική βελτίωση στην αντοχή, στη στιβαρότητα και στην ευστάθεια του εδάφους, και οδηγεί σε ευμενέστερες συνθήκες διάνοιξης. Τα αποτελέσματα της διαφέρουν για τα κοκκώδη και τα συνεκτικά εδάφη. Αντίθετα, μια ανύψωση της στάθμης των υπόγειων νερών θα δημιουργούσε γενικά δυσμενέστερες συνθήκες διάνοιξης. Η μεταβολή της στάθμης των υπόγειων νερών έχει λίγη επίδραση στη βραχομάζα, αλλά μπορεί να επιδράσει σημαντικά στη διατμητική αντοχή των ασυνεχειών του πετρώματος.

Η βασική επίδραση του υποβιβασμού της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα και της εξ αυτής μείωσης της πίεσης των πόρων είναι η αύξηση της ενεργού τάσης μεταξύ των κόκκων του εδάφους και των τεμαχών του πετρώματος. Αυτή προκαλεί αύξηση της αντοχής και δυστροπίας στα συνεκτικά εδάφη, αν και λόγω της σχετικά χαμηλής διαπερατότητάς τους αυτές οι αλλαγές θα πάρουν κάποιο χρόνο για να φανερωθούν. Η ευστάθεια των στραγγισμένων κοκκωδών εδαφών και πετρωμάτων βελτιώνεται άμεσα με την αύξηση της ενεργού τάσης που προκαλεί αύξηση της διατμητικής αντοχής. Αντίθετα, η ανύψωση της στάθμης των υπόγειων νερών μειώνει την ενεργή τάση και συνεπώς εξασθενεί το έδαφος. Μέθοδοι ελέγχου των υπόγειων νερών είναι:

Μέθοδοι αποκλεισμού. Μηδενίζει την πίεση του νερού των πόρων, έτσι ώστε η ενεργή τάση να γίνει ίση με την ολική. Αυτό έχει άμεση ευεργετική επίδραση στην αντοχή, τη δυστροπία και την ευστάθεια.

Χαμηλής πίεσης πιεσμένος αέρας. Μειώνει τις εισροές υπόγειων νερών λόγω της μείωσης της διαφοράς της πίεσης που οδηγεί τα υπόγεια νερά μέσω των κοκκωδών εδαφών στη σήραγγα.

Ψύξη εδάφους. Με την πήξη του νερού ενισχύεται και σκληραίνει το έδαφος, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ευστάθεια. Επειδή ο πάγος είναι κατά περίπου 10% λιγότερο πυκνός από το νερό, πρέπει να δίνεται προσοχή στην παροχή της ψύξης για να μην εμφανιστεί σημαντική διόγκωση, που θα προκαλέσει ανύψωση του εδάφους στην επιφάνεια.

Άντληση. Ο μηχανισμός που προκαλεί τα οφέλη στην αντοχή, δυστροπία και σταθερότητα, λόγω απομάκρυνσης του νερού περιγράφηκε παραπάνω. Εντούτοις, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι μια αύξηση στην ενεργό τάση προκαλεί μια στερεοποίηση του εδάφους. Μια περαιτέρω συνέπεια της απομάκρυνσης νερού είναι η προοδευτική αφαίρεση των λεπτότερων κόκκων από την εδαφική μήτρα. Πρέπει επομένως πάντα να εξετάζεται η δυνατότητα πρόκλησης επίγειων καθιζήσεων.

3.3.1.6 Μέθοδοι βελτίωσης της γεωμάζας

Διήθηση με ένεμα. Μόλις πήξη το ένεμα,, η αντοχή και η ευστάθεια του εδάφους και του πετρώματος βελτιώνονται σημαντικά. Προσοχή θα πρέπει να δοθεί για να μην εισπιεστεί υπερβολική ποσότητα ενέματος, που θα μπορούσε να αναγκάσει τη γεωμάζα να ανυψωθεί.

Συμπύκνωση. Η τοποθέτηση σε στρώματα και η πλήρης συμπύκνωση επιλεγμένου εδάφους ή λιθοριπής, παράγει τεχνητό έδαφος μεγάλης πυκνότητας, που πλεονεκτεί σε σχέση με το φυσικό έδαφος, στο ότι οι ιδιότητές του είναι αξιόπιστα γνωστές. Πρέπει να σημειωθεί ότι συμπύκνωση έχει ένα περιορισμένο βάθος επιρροής λίγων δεκάδων εκατοστών.

Εκτόξευση ενέματος ή αντικατάσταση με δόνηση (Jet grouting). Με διαφορετικούς τρόπους, οι τεχνικές αυτές παρέχουν και οι δύο κατακόρυφα ενισχυμένες στήλες υπεδάφους, και συμπυκνωμένες και ενισχυμένες γεωμάζες μεταξύ των στηλών.

Δυναμική συμπύκνωση. Αυτή η τεχνική κανονικά δεν είναι αποτελεσματική στα συνεκτικά εδάφη, αλλά μπορεί να βελτιώσει τη σχετική πυκνότητα των κοκκωδών εδαφών κατά περίπου 30% έως 50%, που έχει ως αποτέλεσμα, τη σημαντική αύξηση της διατμητικής αντοχής.

3.3.1.7 Αξιολόγηση δυνητικών απρόβλεπτων συνθηκών

Δεν είναι ασυνήθιστο για μια γεωτεχνική έρευνα, ακόμη και σε μια βασισμένη στα αυστηρότερα και περιεκτικότερα γεωτεχνικά προγράμματα, να αποτύχει να αποκαλύψει συνθήκες υπεδάφους που εμφανώς διαφέρουν από εκείνες που υποδεικνύονται για τη διαδρομή της σήραγγας, και βασίζονται σε εκτελεσμένες διερευνητικές γεωτρήσεις και εργαστηριακές δοκιμές. Γι' αυτό, η έκθεση αξιολόγησης πρέπει να εξετάζει, όσο το δυνατόν πληρέστερα, την εικόνα του εδάφους συνολικά, και να προσδιορίζει οποιεσδήποτε πιθανές ανωμαλίες δεν ανιχνεύονται άμεσα από την έρευνα. Βασικά πρέπει να περιέχει την εκτίμηση των γεωλογικών

ή ανθρωπογενών καταστάσεων που θα μπορούσαν ενδεχομένως να είναι παρούσες μεταξύ των θέσεων των διερευνητικών γεωτρήσεων και των δοκιμών. Παραδείγματα τέτοιων καταστάσεων είναι:

- κοιλότητες απόπλυσης σε ιζηματογενή συνεκτικά στρώματα, γεμισμένα με υπέδαφος διαφορετικής προέλευσης.
- φακοί υπόγειων νερών ή στρώματα κοκκώδους υλικού μέσα σε συνεκτικά στρώματα.
- κοιλότητες στους βράχους, παραδείγματος χάριν οπές στην κρητίδα, καρστ λόγω διάλυσης στον ασβεστόλιθο, μερικές φορές εν μέρει ή πλήρως γεμισμένες με αμμοχάλικα, ιλύες ή αργίλους.
- ανθρωπογενή εμπόδια, συμπεριλαμβανομένων των πασσάλων, βαθιών αποχετεύσεων ή προηγούμενων σηράγγων.
- γεμισμένες εκσκαφές – ανθρωπογενείς ή φυσικές κοιλότητες της επιφάνειας.
- χημικά μολυσμένο έδαφος.
- παλαιά ορυχεία.
- μεθάνιο ή άλλα επικίνδυνα αέρια.
- υπόγειοι ή "χαμένοι" ποταμοί, ή αρτεσιανά / υπό-αρτεσιανά εισρέοντα υπόγεια νερά.
- αλλαγές μεταξύ των σκληρών και μαλακών συνθηκών υπεδάφους που έχουν σημαντική επίδραση στο ρυθμό διάνοιξης των σηράγγων.
- παραλλαγές στο βάθος υπερκειμένων ή στην κάλυψη από ισχυρό πέτρωμα.

Αυτός ο κατάλογος δεν είναι πλήρης, ούτε όλοι αυτοί οι τύποι χαρακτηριστικών γνωρισμάτων αναμένονται εύλογα για κάθε διαδρομή σηράγγων. Επίσης, αν και τα αποτελέσματα των σεισμών ή των δονήσεων είναι γενικά περιορισμένα σε βαθιές ή ακόμα και σε ρηχές σήραγγες, πρέπει να εξετάζονται στις περιοχές που υποβάλλονται σε δονήσεις, όπως πλησίον ορυχείων ή κοντινών ενεργών ρηγμάτων.

3.3.2 Γεωτεχνικές παράμετροι

3.3.2.1 Γεωτεχνικές παράμετροι της μελέτης

Οι απαραίτητες γεωτεχνικές παράμετροι της μελέτης πρέπει να καθορίζονται στο τμήμα της GIR που εξετάζει την αξιολόγηση των συνθηκών της γεωμάζας σε σχέση με τη μελέτη και την κατασκευή. Για τα έργα σηράγγων αυτές οι παράμετροι λαμβάνονται συνήθως από τις πληροφορίες που περιλαμβάνονται στη GFR, δηλαδή τις περιγραφές εδάφους ή/και βράχου και τα αποτελέσματα υπαίθριων και εργαστηριακών δοκιμών. Ο Πίνακας 3-7 απαριθμεί τις γεωτεχνικές παραμέτρους που λαμβάνονται συνήθως και αναφέρει πώς εφαρμόζονται στη μελέτη της διάνοιξης των σηράγγων. Λόγω της σύνθετης φύσης των γεωλογικών υλικών, οι τιμές πρέπει να επιλέγονται με μεγάλη προσοχή. Μερικές από τις αρχές που περιλαμβάνονται στην επιλογή των τιμών και μερικά παραδείγματα των διαδικασιών λήψης αποφάσεων δίνονται παρακάτω.

3.3.2.2 Εύρος διακύμανσης παραμέτρων

Για τον χαρακτηρισμό των ιδιοτήτων των βιομηχανικών υλικών, που χρησιμοποιούνται στη στήριξη των σηράγγων (συνηθέστερα είναι σκυρόδεμα και χάλυβας) και των φυσικών γεωλογικών υλικών (εδάφη και βράχοι), απαιτούνται πλήρως διαφορετικές διαδικασίες. Τα βιομηχανικά υλικά κατασκευάζονται σε ελεγχόμενες συνθήκες είτε στα εργοστάσια όπως τα προϊόντα χάλυβα και τα προκατασκευασμένα στοιχεία σκυροδέματος είτε αναμίχθηκαν στο εργοτάξιο, όπως το έγχυτο ή ψεκασμένο σκυρόδεμα. Οι απαιτούμενες τεχνικές ιδιότητές τους μπορούν να καθοριστούν στη διαδικασία της μελέτης με υψηλό βαθμό εμπιστοσύνης για τη συμπεριφορά τους. Αντίθετα, οι τεχνικές ιδιότητες των γεωυλικών έχουν οριστεί ήδη από τη φύση. Ως εκ τούτου, υφίσταται αναπόφευκτα διασπορά και αβεβαιότητα σε αυτές τις ιδιότητες. Αυτό αφήνει στο μελετητή των σηράγγων το πρόβλημα επιλογής των πιο κατάλληλων γεωτεχνικών παραμέτρων μελέτης από μια εκτενή σειρά περιγραφών της γεωμάζας, και αποτελεσμάτων δοκιμών υπαίθρου και εργαστηρίου. Δεν υπάρχει καμία απλή, καθολική λύση σε αυτό το πρόβλημα, δεδομένου ότι κάθε έργο σηράγγων έχει μοναδικότητα απαιτήσεων και συνθηκών υπεδάφους. Εντούτοις, είναι δυνατό να καθοριστούν μερικές γενικές κατευθυντήριες αρχές και να δοθούν μερικά απλά παραδείγματα της διαδικασίας επιλογής.

Πίνακας 3-7. Συνήθεις γεωτεχνικές παράμετροι και εφαρμογή τους

Γεωτεχνική παράμετρος	Σύμβολο	Εφαρμογή στη μελέτη διάνοιξης
Περιγραφή εδάφους ή/και πετρώματος από περιστροφική πυρηνοληψία		Καθορίζει τους τύπους εδαφών
Ποιότητα πετρώματος	Q, RMR	Μέγεθος της υποστήριξης
Ποσοστό πυρηνοληψίας και κατάσταση πυρήνα	TCR, SCR, RQD	Κατάσταση του πετρώματος
Ολικό και ενεργό μοναδιαίο βάρος	γ, γ΄	Πίεση υπερκειμένων
Σχετική πυκνότητα χονδρόκοκκων εδαφών	Dr	Κατάσταση φυσικής συμπύκνωσης του κοκκώδους εδάφους
Περιεκτικότητα σε υγρασία	w	Καταγραφή αλλαγής ιδιοτήτων με το βάθος
Ειδικό βάρος	Gs	Τύπος εδάφους
Δείκτες πλαστικότητας και υδαρότητας	LL, LP, PI, LI	Τύπος και αντοχή του συνεκτικού εδάφους
Κοκκομετρική διαβάθμιση		Σύνθεση του μαλακού εδάφους
Μονοαξονική θλιπτική αντοχή	qu	Αντοχή άρρηκτου πετρώματος
Δείκτης σημειακής φόρτισης ακανόνιστου τεμάχους	Ip	Αντοχή άρρηκτου σκληρού πετρώματος
Αξονικοί και διαμετρικοί δείκτες σημειακής φόρτισης	Ia, Id	Αξονική και διαμετρική αντοχή άρρηκτου δοκιμίου
Αστράγγιστη διατμητική αντοχή	Cu, Su	Διατμητική αντοχή εδάφους
Στραγγιζόμενη διατμητική αντοχή	C	Μακροπρόθεσμη συνοχή μαλακού εδάφους
Γωνία διατμητικής αντοχής	φ, φ΄	Μακροπρόθεσμη διατμητική αντοχή συνεκτικού εδάφους. Μικρό- και μακροπρόθεσμη διατμητική αντοχή κοκκώδους εδάφους
Στραγγιζόμενο μέτρο παραμόρφωσης	E΄	Μακροπρόθεσμη παραμορφωσιμότητα
Λόγος Poisson	ν	Επηρεάζει την παραμορφωσιμότητα
Συντελεστές ενεργών ωθήσεων γαιών	K0, Kα, Kp	Λόγος οριζόντιων και κατακόρυφων ενεργών ωθήσεων σε ηρεμία, ενεργός και παθητική
Φυσικό εντατικό πεδίο	σ	Μέγεθος κυρίων τάσεων στο πέτρωμα σε τρεις κατευθύνσεις
Διαπερατότητα	k	Χαρακτηριστικές διαπερατότητες του πετρώματος, και παραλλαγές της. Στεγανοποίηση.
pH, περιεκτικότητα σε θειικά και χλωριόντα	pH, SO3, Cl	Ανθεκτικότητα σκυροδέματος και χάλυβα
Χημική μόλυνση		Έκταση της μόλυνσης του εδάφους
Λειαντικότητα		Ρυθμός φθοράς κοπτικών εργαλείων

3.3.2.3 Λήψη και χρήση σχετικών πληροφοριών

Βασική αρχή στον καθορισμό της έκτασης εφαρμογής των ερευνών υπαίθρου και εργαστηρίου σε κάθε φάση, είναι, ότι όλες οι διερευνητικές γεωτρήσεις και δοκιμές σκοπό έχουν να δώσουν πληροφορίες άμεσα σχετικές με τη μελέτη και την κατασκευή των σηράγγων. Εάν δεν είναι έτοιμη η απάντηση στην ερώτηση "πώς θα χρησιμοποιηθούν οι πληροφορίες από την γεώτρηση ή δοκιμή;" τότε η δραστηριότητα αυτή δεν θα ανταποδώσει το κόστος της. Για τη μελέτη της υποστήριξης είναι απαραίτητο να ληφθούν πληροφορίες για τις γεωτεχνικές παραμέτρους. Ο καθορισμός των γεωτεχνικών ιδιοτήτων μερικών γεωλογικών σχηματισμών μπορεί να πραγματοποιηθεί με εμπιστοσύνη, όπως προκύπτει είτε από προηγούμενη εμπειρία διάνοιξης μέσα σε παρόμοια γεωμάζα, είτε από το γεγονός ότι αυτά τα στρώματα είναι σχετικά ομοιόμορφα. Η άργιλος του Λονδίνου είναι ένα καλό παράδειγμα προηγούμενης εμπειρίας διάνοιξης και ο πηλίτης της Mercia, των ομοιόμορφων στρωμάτων. Σε αναμονή τέτοιων σχηματισμών μπορεί να αποφασιστεί να υπάρξουν λιγότερες γεωτρήσεις, κατευθύνοντας ίσως ένα ποσοστό της προκύπτουσας μείωσης κόστους σε περιπλοκότερες δειγματοληψίες και δοκιμές, που στοχεύουν, παραδείγματος χάριν, στην καλύτερη κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς για μικρή παραμόρφωση.

Δυστυχώς, ένα μεγάλο μέρος των διανοιγόμενων σηράγγων αποκλίνει εμφανώς από τις πιο ομοιόμορφες γεωτεχνικές συνθήκες. Η προσέγγιση σε αυτές τις περιπτώσεις είναι η εξασφάλιση επαρκών γεωτρήσεων ώστε να αποκτηθεί μια περιεκτική εικόνα της γεωμάζας τόσον συνολικά όσον και στις παραλλαγές κατά μήκος της διαδρομής των σηράγγων. Όλες οι δοκιμές εργαστηρίου και υπαίθρου πρέπει να εξυπηρετούν ένα σκοπό. Παραδείγματος χάριν, δεν αξίζει η ανάληψη λίγων προσδιορισμών της φυσικής υγρασίας σε διαταραγμένα δείγματα διαφορετικών τύπων εδάφους, δεδομένου ότι θα ήταν αδύνατο να συσχετισθούν τα αποτελέσματα αυτών των δοκιμών μεταξύ τους. Ούτε θα υπήρχαν αρκετοί προσδιορισμοί ώστε να εξεταστεί η διασπορά των αποτελεσμάτων σε κάθε συγκεκριμένο εδαφικό τύπο. Σε κάθε περίπτωση η επιλογή διαταραγμένων δειγμάτων για αυτές τις δοκιμές είναι ακατάλληλη, επειδή, λόγω της διαταραχής, δίνουν αναξιόπιστα αποτελέσματα. Αντίθετα, ο προσδιορισμός της φυσικής υγρασίας (μια σχετικά ανέξοδη δοκιμή) σε μεγάλο αριθμό από αδιατάρακτα δείγματα σε συγκεκριμένα στρώματα, προκειμένου να περιγραφεί η παράμετρος με το βάθος και μεταξύ των θέσεων γεωτρήσεων, μπορεί να αξίζει το κόστος πραγματοποίησής της, εφόσον δυνηθεί να συσχετιστεί με σημαντικότερες ιδιότητες.

Η σε φάσεις πραγματοποιούμενη έρευνα πλεονεκτεί, καθόσον οι διαδικασίες διερεύνησης και μελέτης πρέπει να είναι διαδραστικές, και οι πληροφορίες που αναζητούνται για τη μελέτη να εστιάζονται βαθμιαία.

3.3.2.4 Προσδιορισμός τύπων γεωμάζας

Κανονικά πρέπει να υπάρχει ισχυρή αλληλεξάρτηση μεταξύ των τύπων εδάφους και των τιμών των αποτελεσμάτων των δοκιμών, καθώς επίσης και μεταξύ των αποτελεσμάτων των δοκιμών κάθε τύπου. Οποιεσδήποτε ασυνέπειες πρέπει να εφιστούν την προσοχή για την ανάγκη περαιτέρω έρευνας ή/και δοκιμών.

Παραδείγματος χάριν, τα χονδρόκοκκα εδάφη αναμένεται να έχουν πολύ υψηλότερες διαπερατότητες από τα λεπτόκοκκα, αλλά η διασπορά των τιμών στις δοκιμές διαπερατότητας κάθε τύπου εδάφους μπορεί να είναι πολύ μεγάλη. Η διαφορά μιας τάξης μεγέθους μεταξύ των τιμών των δοκιμών στο ίδιο γεωλογικό στρώμα (δηλ. ένα αποτέλεσμα δοκιμής που παρουσιάζει περίπου δέκα φορές περισσότερη διαπερατότητα από μια άλλη) είναι εύλογο, αλλά η διαφορά δύο τάξεων μεγέθους μεταξύ τους θα μπορούσε να επισημάνει ότι οι συνθήκες του υπεδάφους δεν έχουν προσδιοριστεί πλήρως. Η περαιτέρω έρευνα θα μπορούσε να οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι υπάρχουν αμμώδεις φακοί μέσα σε ένα στρώμα αργίλου στο οποίο δεν αναμένονταν αρχικά. Άλλο παράδειγμα προσφέρουν οι έρευνες για τη μελέτη διάνοιξης της σήραγγας της Μάγχης. Επαναλαμβανόμενες παραλλαγές στις αναλογίες αργίλου, ανθρακικών στην Κατώτερη Κρητίδα συσχετίζονταν με τη διαπερατότητα.. Οι πληροφορίες αυτές βοήθησαν τις αποφάσεις για την χάραξη της σήραγγας (Muir Wood, 2000) και τις προβλέψεις των συνθηκών της γεωμάζας μπροστά από τα διανοιγόμενα μέτωπα.

3.3.2.5 Άνω και κάτω όρια των παραμέτρων της μελέτης

Ούτε ένα αποτέλεσμα δοκιμής δεν πρέπει να απορριφθεί ως αναξιόπιστο επειδή η τιμή του είναι πολύ υψηλότερη ή χαμηλότερη από τις άλλες. Ένα τέτοιο αποτέλεσμα μπορεί να οφείλεται στη διαταραχή του δείγματος της δοκιμής, αλλά θα μπορούσε να αποτελεί μια γνήσια απόκλιση από τον κανόνα. Παραδείγματος χάριν, οι μονοαξονικές αντοχές που καταγράφονται σε δοκίμια άρρηκτου πετρώματος θα μπορούσαν να είναι πολλές φορές μεγαλύτερες από ένα αποτέλεσμα που επιτεύχθηκε σε ένα δοκίμιο του ίδιου πετρώματος που είναι εκ πρώτης όψεως άρρηκτο και ομοιογενές αλλά, στη δοκιμή, βρίσκεται ότι περιέχει μια λεπτή φλέβα ασθενέστερου υλικού. Η παρουσία τέτοιων φλεβών θα μπορούσε να έχει μεγάλη σημασία για τη μηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας συνολικά. Οποιαδήποτε τέτοια εύρεση προειδοποιεί για την ανάγκη περαιτέρω έρευνας ή επανεξέτασης των δειγμάτων.

Λαμβάνοντας υπόψη τις ποικιλομορφίες, προέλευσης των σχηματισμών και έργων σηράγγων, δεν μπορεί να υπάρξει κανένας απόλυτος και γρήγορος κανόνας για την επιλογή των τιμών κάθε γεωτεχνικής παραμέτρου σχεδιασμού, ούτε για το εύρος τους. Είναι κοινή πρακτική να παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των επί τόπου και των εργαστηριακών δοκιμών υπό μορφή διαγραμμάτων, και έπειτα να πραγματοποιούνται στατιστικές αναλύσεις για την εξαγωγή γεωτεχνικών παραμέτρων σχεδιασμού. Μολονότι αυτό μπορεί να είναι χρήσιμο, μπορεί να οδηγήσει στην επιλογή ακατάλληλων τιμών για αυτές τις παραμέτρους. Για αυτό συχνά ζητείται η επιλογή των μέγιστων και ελάχιστων τιμών κάθε παραμέτρου, ενώ χρήσιμοι είναι και οι έλεγχοι ευαισθησίας.

Ο προσδιορισμός της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής σχεδιασμού της αργίλου του Λονδίνου αποτελεί καλό παράδειγμα για το πώς να επιλεγούν μέγιστες και ελάχιστες τιμές με εμπιστοσύνη. Κατ' αρχάς, εφόσον τα αποτελέσματα των δοκιμών έχουν κοινή βάση σύμφωνα με τη μέθοδο της δοκιμής (δηλ. ίδια διάμετρος των δοκιμίων, ίδιος ρυθμός διάτμησης, κ.λπ.), οι αστράγγιστες διατμητικές αντοχές σχεδιάζονται

έναντι του βάθους για ομάδες γεωτρήσεων που κρίθηκαν, από τη διαδικασία προσδιορισμού γεωτεχνικών τύπων, ότι περιέχουν παρόμοιες γεωτεχνικές τομές. Έπειτα, προσδιορίζονται οι ακριβείς σκοποί για τους οποίους απαιτείται η παράμετρος. Αυτό βοηθά στο να καθορισθεί εάν απαιτούνται οι ελάχιστες ή οι μέγιστες τιμές. Για τον σχεδιασμό της επένδυσης των σηράγγων απαιτούνται οι ελάχιστες τιμές.

Το επόμενο βήμα, επομένως, είναι να σχεδιαστούν διαγράμματα της ελάχιστης διατμητικής αντοχής με το βάθος. Δεδομένου ότι οι τιμές σχεδιασμού θα ποικίλουν με το βάθος και με τη θέση, πρέπει να αναμένεται ότι οι γραμμές θα είναι κεκλιμένες (γενικά, αλλά όχι απαραίτητα, η αντοχή αυξάνεται με το βάθος). Είναι επίσης πιθανό ότι θα υπάρχουν διαφορετικά διαγράμματα που θα αντιπροσωπεύουν τα διαφορετικά τμήματα της διαδρομής της σήραγγας. Μπορεί επίσης να είναι χρήσιμη η σχεδίαση της χωρικής και διευθυντικής παραλλαγής για τον καθορισμό των διαφόρων τύπων. Γραμμές ελαχίστων μπορούν να σχεδιαστούν δεξιά από τα αποτελέσματα κάποιων δοκιμών, για να απεικονίσουν ότι οι τιμές σχεδιασμού είναι υψηλότερες από μερικές πραγματικές τιμές σε ορισμένα βάθη.

3.3.2.6 Ανάλυση ευαισθησίας

Η ανάλυση ευαισθησίας στις γεωτεχνικές παραμέτρους σχεδιασμού αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για την εξέταση τυχόν δυσμενών καταστάσεων. Η διαδικασία της επιλογής παραμέτρων σχεδιασμού πρέπει να έχει ακολουθήσει τις οδηγίες επεξεργασίας στοιχείων που περιγράφηκαν παραπάνω, και που καταλήγουν στην επιλογή των ελάχιστων και μέγιστων τιμών των παραμέτρων. Εάν απαιτείται, μπορεί να εξεταστεί εάν ο σχεδιασμός εξακολουθεί να είναι ικανοποιητικός, με ένα χαμηλότερο περιθώριο της ασφάλειας, για έναν συνδυασμό γεωτεχνικών καταστάσεων που ονομάζονται οι "πιστευτά χειρότερες". Εάν η παραλλαγή είναι μικρής κλίμακας, μια στατική ανάλυση είναι απίθανο να βασιστεί στις πιο απαισιόδοξες τιμές.

Ένα σχετικό αλλά ενδεχομένως κρίσιμο παράδειγμα στο οποίο η ανάλυση ευαισθησίας γεωτεχνικής παραμέτρου σχεδιασμού έχει αξία, είναι στην αξιολόγηση της ευαισθησίας μιας επένδυσης σήραγγας στις μεγάλου εύρους τιμές του συντελεστή πλευρικής ώθησης *(K_0* - σε ηρεμία, K_a - ενεργή, K_p - παθητική). Ανάλογα με τις περιστάσεις, οι πραγματικές πιέσεις περιορισμού που εφαρμόζονται γύρω από τις κυκλικές σήραγγες μπορούν να διαφέρουν εμφανώς από τις θεωρητικά προβλεφθείσες τιμές, τόσον σε απόλυτες τιμές όσον και στο λόγο μεταξύ οριζόντιων και κάθετων ενεργών τάσεων. Τα αποτελέσματα, στο περιθώριο ασφάλειας της επένδυσης των σηράγγων, μπορούν να είναι δραματικά εάν, παραδείγματος χάριν, δεν υπάρχει πίεση περιορισμού στις πλευρές της σήραγγας αλλά υπάρχει πλήρης κατακόρυφη φόρτιση υπερκειμένων που δρα στη στέψη της σήραγγας. Τέτοιες ακραίες καταστάσεις της πίεσης περιορισμού μπορούν να ερευνηθούν εύκολα από την ανάλυση ευαισθησίας, αφού πρώτα καθοριστούν τα πρακτικά όρια των συντελεστών ώθησης. Μερικές φορές, αυτή η ανάλυση μπορεί να οδηγήσει σε ανησυχητικά συμπεράσματα, που συνεπάγονται επανασχεδιασμό, αλλά αυτό θα είναι απείρως πιο επιθυμητό από μια αστοχία της επένδυσης μετά από την κατασκευή.

Αξίζει επίσης να τονιστεί η σημασία της κατάλληλης επιλογής μιας ιδιαίτερης γεωτεχνικής παραμέτρου σχεδιασμού, του μέτρου παραμορφωσιμότητας. Αυτό ορίζεται ως η αναλογία μεταξύ της εφαρμοζόμενης τάσης και της προκύπτουσας παραμόρφωσης. Οι τιμές που υιοθετούνται όμως μπορεί να είναι ακατάλληλες εάν αφορούν υψηλά επίπεδα παραμόρφωσης, ενώ πολλές σήραγγες κατασκευάζονται με δυνατότητα μικρής παραμόρφωσης. Πάλι, μπορούν να αναληφθούν έλεγχοι ευαισθησίας για να προσδιορίσουν τις συνέπειες της επιλογής τιμών του μέτρου, που αντιστοιχούν σε διαφορετικά επίπεδα παραμόρφωσης.

3.3.2.7 Συνθήκες αναφοράς της γεωμάζας

Η έκθεση γεωτεχνικής αξιολόγησης (GIR) είναι το κείμενο στο οποίο η μελέτη (π.χ. η οριστική μελέτη υποστήριξης σήραγγας) αναφέρεται για τις γεωτεχνικές παραμέτρους,. Παρακάτω δίνεται η λογική για την ύπαρξη, σε όλα τα έργα σηράγγων, μιας γεωτεχνικής έκθεσης βάσης (GBR), στην οποία βρίσκονται οι συμβατικές συνθήκες αναφοράς της γεωμάζας. Η GIR και η GBR είναι χωριστά έγγραφα που εξυπηρετούν διαφορετικές ανάγκες. Η GBR βασίζεται στο περιεχόμενο της γεωτεχνικής έκθεσης πεπραγμένων (GFR) και την GIR αλλά είναι πιθανό να είναι ένα σημαντικά διαφορετικό έγγραφο, δεδομένου ότι σκοπός της πρώτιστα η επισύναψή της στη σύμβαση, και όχι η εξυπηρέτηση των αναγκών της μελέτης.

Ο καθορισμός των συνθηκών αναφοράς της γεωμάζας είναι σημαντικός για τις συμβάσεις σηράγγων, λαμβάνοντας υπόψη το παρελθόν της βιομηχανίας σηράγγων που είναι γεμάτο από υπερβάσεις του προϋπολογισμού, άμεσα αποδιδόμενες στους ισχυρισμούς πραγματικών συνθηκών γεωμάζας που διαφέρουν σημαντικά από τις προσδοκώμενες. Ιστορικά έχει αποδειχθεί δύσκολη η με ακρίβεια ποσοτικοποίηση των αξιώσεων από τους αναδόχους για απρόβλεπτες συνθήκες γεωμάζας, λόγω της έλλειψης σαφώς καθορισμένων

συνθηκών σύγκρισης συμφωνημένων κατά την έναρξη της σύμβασης μεταξύ του πελάτη, του αναδόχου και του μελετητή. Η GBR είναι ένα λογικό εργαλείο για αυτό το πρόβλημα.

Η ιδέα της ύπαρξης μιας GBR στη σύμβαση δεν είναι νέα, δεδομένου ότι αποτελεί συνήθη πρακτική στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής προ πολλού, στο Ηνωμένο Βασίλειο μεταγενέστερα, και στην Ελλάδα τελευταία. Είναι ιδιαίτερα σκόπιμο να προετοιμάζεται μία GBR για όλα τα μελλοντικά έργα σηράγγων. Μια GBR πρέπει να αποτελεί ένα μέρος της σύμβασης, ανεξάρτητα από τον τύπο σύμβασης, που θα είναι ανοιχτή και εύκολα διαθέσιμη σε όλα τα συμβαλλόμενα μέρη που συνδέονται με το έργο της σήραγγας. Παραδείγματα χρήσης της GBR περιλαμβάνουν τη ρητή αφαίρεση ενός σοβαρού κινδύνου χαμηλής πιθανότητας από την ευθύνη του αναδόχου, και τη διάκριση της διάνοιξης σε κατηγορίες κατασκευής και πληρωμής σχετιζόμενες με την ποιότητα της γεωμάζας.

Όλα τα αποκτηθέντα σχετικά στοιχεία που συγκεντρώνονται για την αξιολόγηση των συνθηκών διάνοιξης ενός έργου σήραγγας, πρέπει να θεωρούνται ως πολύτιμα δεδομένα για τη μελέτη και την κατασκευή. Επομένως η GIR πρέπει να τίθεται στη διάθεση του αναδόχου για την πληροφόρησή του και, ενδεχομένως, χωρίς εγγύηση εκτός αν παρέχει τη βάση για τις συνθήκες αναφοράς.

Ο πρωταρχικός σκοπός της GBR είναι η καθιέρωση δήλωσης προσδιορισμού των προσδοκώμενων γεωτεχνικών συνθηκών πριν από την κατασκευή των σηράγγων, ως βάση για συμβατική αναφορά εάν απαιτηθεί στη συνέχεια. Το συμβατικό πλαίσιο που υιοθετείται για την κατασκευή θα απεικονίζει την προσέγγιση του πελάτη και την αποδοχή του κινδύνου. Είναι σύνηθες ότι οι κίνδυνοι που συνδέονται με συνθήκες που είναι σύμφωνες ή λιγότερο δυσμενείς από τη βάση ανατίθενται στον ανάδοχο, και ο πελάτης δέχεται εκείνους τους κινδύνους που είναι σημαντικά δυσμενέστεροι από τη βάση.

Στις περιπτώσεις που ο πελάτης αναθέτει σε μελετητή την εκπόνηση της οριστικής μελέτης της σήραγγας, η GBR είναι καλό, χωρίς αυτό να είναι απαραίτητο, να καθορίζει τις γεωτεχνικές παραμέτρους σχεδιασμού που χρησιμοποιήθηκαν και τις συνθήκες κατασκευής που υποτέθηκαν για τη μελέτη της διάνοιξης των σηράγγων. Στα έργα για τα οποία ο πελάτης αναθέτει σε έναν μελετητή την εκπόνηση μόνο της προκαταρκτικής ή προμελέτης της σήραγγας, και στον ανάδοχο εκτός από την κατασκευή και την οριστική μελέτη της σήραγγας, η GBR δεν θα καθορίζει τις γεωτεχνικές παραμέτρους της μελέτης, δεδομένου ότι αυτές θα καθοριστούν από το μελετητή του αναδόχου.

Βιβλιογραφία

Attewell PB (1995). "Tunnelling Contracts and Site Investigation", E & FN Spon

Barton, N. R. and Bandis, S. C. (1982). Effects of block size on the shear behaviour of jointed rock. *23rd US Symp. on Rock Mech., Berkeley,* pp.739-760.

Barton, N. R. and Choubey, V. (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics* **10,** 1-54.

Bell FG (2008). "Engineering Geology", second edition, BH.

British Standards Institution (1999). *Code of Practice for Site Investigations.*BSI, London, BS 5930.

BTS/ICE (2004). Tunnel Lining Design Guide, Thomas Telford.

Clayton, C. R. L, Simons, N. E. and Matthews. M. (1982). *Site Investigations.* Granada Technical Books, Manchester.

Construction Industry Research and Information Association (1978). *Tunnelling - Improved Contract Practices*, CIRIA, London, Report 79.

Essex, R. J. (1997). Geotechnical Baseline Reports for Underground Construction, Guidelines and Practices, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.

Franklin JA, Broch E and Walton G (1971). Logging the mechanical character of rock", Trans. IMM, A, 80, Bul. 77a, A1-A9.

Glossop, R. (1968). The rise of geotechnology and its influence on engineering practice. *Geotechnique* **18,** pp. 107-150.

Heuer R.E. (1974). "Important ground parameters in soft ground tunnelling". Subsurface excavation for underground excavation and heavy construction, New England College, Henniker, New Hampshire, American Society of Civil Engineers, New York, p.41-55.

Hoek, E. (2000). *Practical Rock Engineering; Hoek's Corner,* Roc Science website: www.rocscience.com.

Hoek, E., Kaiser, P. K. and Bawden, W. F. (1995). *Support of Underground Excavations in Hard Rock.* Balkema, Rotterdam.

Kany M (1974). Berechnung vom Flächengründungen, Band 2, Berlin, München.

Muir Wood, A. (2000). *Tunnelling: Management by Design.* E & F N Spon, London and New York.

Parker HW (1996). *Geotechnical Investigations*, ch. 4 in "Tunnel Engineering Handbook", ed. Bickel JO, Kuesel TR, King E., Chapman and Hall.

Perry, J. and West, G. (1996). *Sources of Information for Site Investigations in Britain.* Transport Research Laboratory, Crowthorne, Report 192 (Revision of TRL Report LR 403).

Pettifer GS and Fookes PG (1994). "A revision of the graphical method for assessing the excavability of rock", Q J Eng Geol 27:145-164

Σακκάς Ι, Αγγέλης Ε, Μπακογιάννης Ι, Καζίλης Ν, Ρόζενμπεργκ Α, Σοφιανός ΑΙ, Μιχάλης Η, Αντωνίου Γ (2002). «ΟΜΟΕ - Τεύχος Οδικών Σηράγγων» ΥΠΕΧΩΔΕ.

Κριτήρια αξιολόγησης

Κριτήριο αξιολόγησης 1

Σήραγγα διανοίγεται σε πέτρωμα με αντοχή σε μονοαξονική θλίψη 15MPa (Η), και μέτριου πάχους στρώσεις (Η). Ταξινομείστε την εξορυξιμότητα του πετρώματος.

Απάντηση/Λύση

Κριτήριο αξιολόγησης 2

Σήραγγα διανοίγεται σε ισχυρά προστερεοποιημένη άργιλο με δείκτη πλαστικότητας πάνω από 30. Ταξινομείστε το έδαφος ως προς τη συμπεριφορά του.

Απάντηση/Λύση

Κριτήριο αξιολόγησης 3

Κυκλική σήραγγα ακτίνας ωφέλιμης διατομής 4m πρόκειται να εκσκαφτεί σε στρωσιγενή ασβεστόλιθο. Δώστε γραμμές που ορίζουν την αποδεκτή εκσκαφή, και αναφέρετε από τι εξαρτάται η μεταξύ τους απόσταση.

Απάντηση/Λύση

Κριτήριο αξιολόγησης 4

Δώστε τις τεχνικές γεωτεχνικής διερεύνησης που βρίσκουν πλήρη εφαρμογή σε σήραγγες μέσου ή μεγάλου βάθους.

Απάντηση/Λύση

Κριτήριο αξιολόγησης 5

Δώστε τις γεωτεχνικές εργαστηριακές δοκιμές που είναι κατάλληλες για τον προσδιορισμό παραμέτρων ισχυρού πετρώματος.

Απάντηση/Λύση

Κριτήριο αξιολόγησης 6

Πως επηρεάζει το καθεστώς των υπόγειων νερών τη μελέτη της διάνοιξης.

Απάντηση/Λύση

Κριτήριο αξιολόγησης 7

Ποιος είναι ο πρωταρχικός σκοπός της GBR.

Απάντηση/Λύση

Κεφάλαιο 4

Σύνοψη
Πρόκειται για διαδοχική μέθοδο διάνοιξης μέσα σε βραχώδεις σχηματισμούς. Αρχικά αναπτύσσονται τα διαδοχικά στάδια της μεθόδου, ο απαιτούμενος εξοπλισμός για την ανατίναξη που είναι τα διατρητικά φορεία, οι εκρηκτικές ύλες που χρησιμοποιούνται, και δίνονται παραδείγματα εφαρμογών. Στη συνέχεια δίνονται τρεις εμπειρικές οδηγίες διάνοιξης ανάλογα με την ποιότητα του πετρώματος, το μέγεθος και τη σημασία του έργου. Το κεφάλαιο κλείνει με οδηγίες για την ανάλυση των επιλεγμένων μεθόδων διάνοιξης με αριθμητικές μεθόδους. Η εμπέδωση επιτυγχάνεται με ασκήσεις και θέμα εφαρμογής.

Προαπαιτούμενη γνώση
Εξόρυξη Πετρωμάτων, Υποστήριξη Υπόγειων Έργων, Μηχανική Πετρωμάτων. Χρήσιμη γνώση: Τεχνική Γεωλογία, Χρήσιμη Βιβλιογραφία: ΧΕ Τσουτρέλης (2001), «Εκρηκτικές Ύλες και Τεχνική των Ανατινάξεων», Τόμοι 1 & 2.

4. Συμβατική διάνοιξη βραχωδών σχηματισμών με ανατινάξεις

4.1 Εισαγωγή

Η όρυξη πετρωμάτων (βράχων[4]) για την κατασκευή σηράγγων πραγματοποιείται παραδοσιακά με την μέθοδο "διάτρηση - ανατίναξη". Στα περισσότερα υπόγεια μεταλλεία σε σκληρά πετρώματα η εξόρυξη αυτή είναι η μόνη πρακτικά δυνατή. Η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε σχηματισμούς που κυμαίνονται από πετρώματα με χαμηλή αντοχή, π.χ. μάργες, άργιλοι, γύψος, κρητίδα, μέχρι τα σκληρότερα πετρώματα, όπως γρανίτης, γνεύσιος, βασάλτης ή χαλαζίας. Λόγω αυτού του μεγάλου φάσματος πιθανών χρήσεων, η μέθοδος μπορεί να πλεονεκτεί όταν οι συνθήκες είναι μεταβαλλόμενες. Η διάταξη των ανατινάξεων και η βαρύτητα των μέτρων υποστήριξης μπορούν να ρυθμίζονται, εφόσον απαιτείται, με κάθε προχώρηση. Η μέθοδος πλεονεκτεί της εκμηχανισμένης διάνοιξης όταν η σήραγγα έχει σχετικά μικρό μήκος, επειδή δεν απαιτεί ιδιαίτερα ακριβό εξοπλισμό ή όταν η σκληρότητα του πετρώματος είναι πολύ υψηλή έτσι ώστε να προκαλείται μεγάλη φθορά των δίσκων κοπής. Άλλοι λόγοι για την επιλογή της μεθόδου είναι η δυνατότητα διαμόρφωσης πολύ μεγάλης διατομής ή διατομής που να διαφέρει από τον κύκλο.

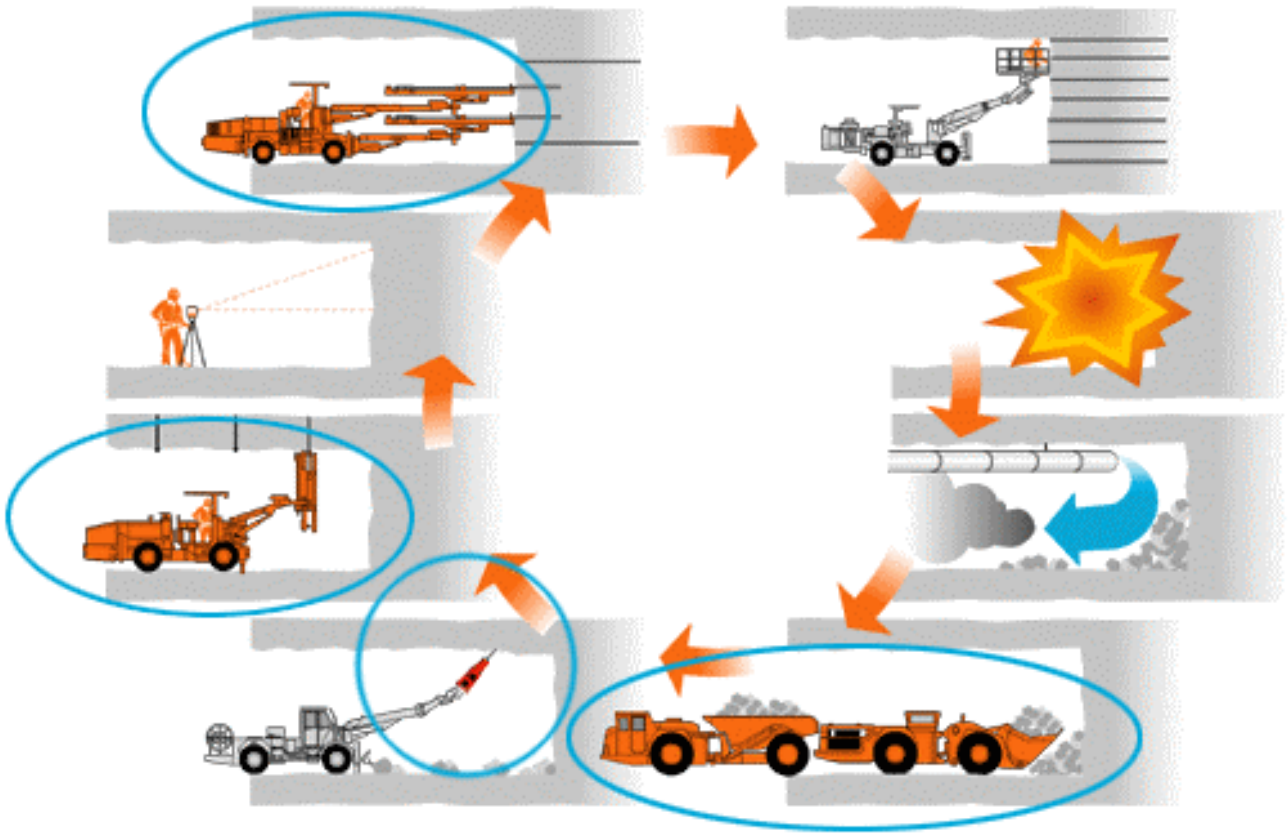
Όπως συμβαίνει με όλες τις μεθόδους διάνοιξης σηράγγων, η διάνοιξη με τη χρήση ανατινάξεων είναι πιο οικονομική όταν η διαδικασία που χρησιμοποιείται είναι επαναλαμβανόμενη. Ως εκ τούτου, κατά το σχεδιασμό η σήραγγα διαχωρίζεται σε τμήματα στα οποία μπορούν να χρησιμοποιούνται η ίδια μέθοδος εξόρυξης και τα ίδια μέτρα στήριξης. Κατά το σχεδιασμό της ανατίναξης θα πρέπει να δίνεται προσοχή ώστε να επιτυγχάνονται μεγάλα βήματα προχώρησης με καλά θραυσμένο πέτρωμα, ακριβή περιγράμματα διατομής και ελαχιστοποίηση των προβλημάτων από τις δονήσεις. Τα σύγχρονα συστήματα διάνοιξης προσφέρουν σημαντικές δυνατότητες υψηλού ρυθμού προχώρησης. Η αποτελεσματικότητα της ανατίναξης και η ποιότητά της προϋποθέτουν καλή μελέτη και εφαρμογή, ώστε να συνδυάζεται ασφάλεια, οικονομία και μεγιστοποίηση του ρυθμού προχώρησης. Όμως, κατά τη διάνοιξη οι επιμέρους εργασίες διεξάγονται διαδοχικά, και γι' αυτό η ταχύτητα προχώρησης είναι πιο αργή σε σύγκριση με την εκμηχανισμένη διάνοιξη της οποίας η εργασίες δύνανται να διεξάγονται συγχρόνως.

---

[4] *Στην εισαγωγή του στην γεωλογία των σηράγγων ο Terzaghi (1946) ονομάζει πέτρωμα (βράχο) το φυσικό υλικό από ορυκτά σωματίδια τα οποία απαιτούν κατά την εκσκαφή χρήση εκρηκτικών υλών. Παρ' όλα αυτά έχει αναφερθεί ψαμμιτικό πέτρωμα, με ασθενές συνδετικό υλικό, που εκσκάφθηκε με εκτόξευση νερού υπό πίεση και του οποίου η αποκομιδή έγινε υδραυλικά.*

4.2 Ο κύκλος «διάτρηση[5]– ανατίναξη»

Οι διαστάσεις μιας σήραγγας επιλέγονται με βάση τη λειτουργία και τη φύση του έργου. Η πρακτικά μικρότερη διάσταση μιας σήραγγας, μέσα στην οποία μπορούν να κινηθούν άτομα, είναι 1.5m. πλάτος και 1.5m ÷2.0m ύψος. Η μέθοδος 'διάτρηση - ανατίναξη' εφαρμόζεται με επιτυχία μέσα σε ανοίγματα διαμέτρου τουλάχιστον 3 ÷ 3.5m, ώστε να υπάρχει ευκολία τοποθέτησης και κίνησης του εξοπλισμού. Η ιδανική διάμετρος για ταχεία διάνοιξη είναι τα 5 ÷ 5.5m. Για μεγαλύτερες διαμέτρους υπάρχει ποικιλία δυνατοτήτων για την επιλογή εξοπλισμού εξόρυξης.



Σχήμα 4-1. Κύκλος εργασιών διάνοιξης με τη μέθοδο διάτρηση-ανατίναξη (TAMROCK, 1999)

Η διάνοιξη της σήραγγας πραγματοποιείται γενικά είτε ολομέτωπα είτε σε δύο φάσεις (Σχήμα 4-2), οπότε προπορεύεται η διάνοιξη της άνω ημιδιατομής και ακολουθεί η βαθμίδα. Η επιλογή του αριθμού των φάσεων εξαρτάται από την ποιότητα της βραχομάζας, το μέγεθος της διατομής, και το διατιθέμενο εξοπλισμό. Η διάνοιξη με ανατινάξεις ανήκει στις συμβατικές [6](conventional) ή διαδοχικές [7](sequential) μεθόδους διάνοιξης, κατά τις οποίες η διάνοιξη κάθε φάσης πραγματοποιείται στα διαδοχικά στάδια που φαίνονται στο Σχήμα 4-1, και είναι τα ακόλουθα:

---

[5] *Από το ρήμα (Liddel & Scott, -) (δια-)τετραίνω (απαντά και ως τιτραίνω, ή τιτράω), του οποίου χωρίς αναδιπλασιασμό απαντώνται μόνον ο μέλλον «τρήσω», και ο αόριστος «έτρησα». Ως εκ τούτου, εφόσον απαιτείται η χρήση του ρήματος σε άλλους χρόνους και φωνές, της δημοτικής, θα ακολουθούνται οι κανόνες των ρημάτων της πρώτης τάξης της δεύτερης συζυγίας, κατά το τρυπώ ή τιμώ, ήτοι: διατρώ –ας –α –ούμε (ή -άμε) – άτε -ούν, διατρούσε, διέτρησε, διατρήσω, διατράται, διατρώνται, διατράτο, διατρήθηκε, διατρηθεί, διατρημένο.*

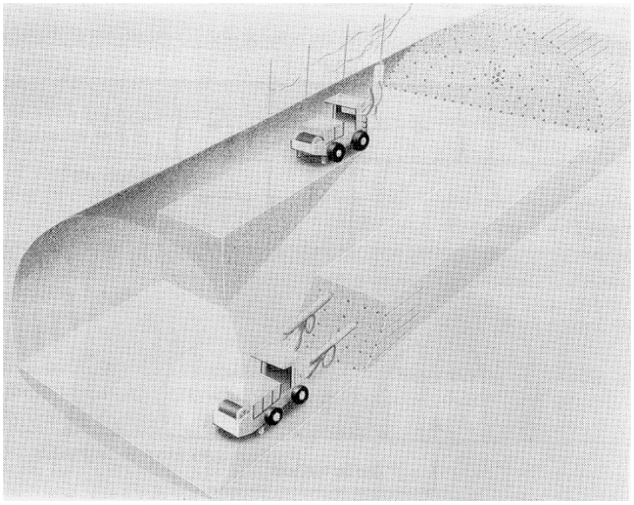
[6] *Συμβατικό είναι αυτό που είναι καθιερωμένο, το παραδοσιακό. Με τον όρο εννοούμε ότι οι διαδικασίες εκσκαφής, υποστήριξης και αποκόμισης των μπαζών πραγματοποιούνται όπως παραδοσιακά, χωρίς να εντάσσονται σε ενιαίο μηχανικό σύστημα διάνοιξης.*

[7] *Με τον όρο υποδηλώνουμε ότι οι διαδικασίες εκσκαφής, υποστήριξης και αποκόμισης των μπαζών πραγματοποιούνται ως διαδοχικές εργασίες*

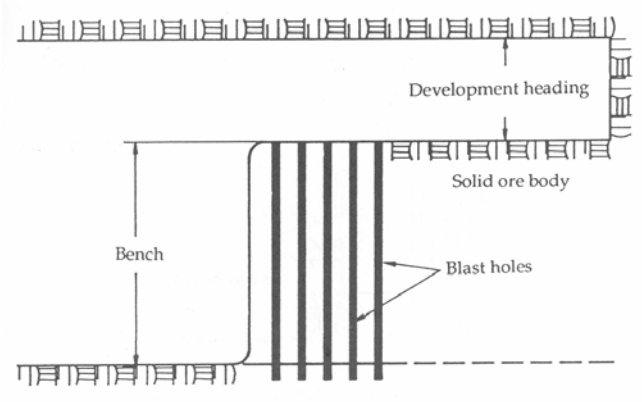
α. Τοπογραφική σήμανση διατρημάτων
β. Όρυξη διατρημάτων
γ. Γόμωση των διατρημάτων
δ. Απομάκρυνση διατρητικών φορείων
ε. Πυροδότηση-ανατίναξη
ς. Αερισμός για την απομάκρυνση αερίων της ανατίναξης
ζ. Αποκόλληση επισφαλών όγκων (Ξεσκάρωμα)
η. Αποκόμιση μπαζών (Ξεμπάζωμα)
θ. Στήριξη του πετρώματος

Τα διατρήματα γενικά ορύσσονται κατά τη διεύθυνση του άξονα της σήραγγας. Όμως, εφόσον η διάνοιξη γίνεται σε δύο φάσεις, η όρυξη της βαθμίδας δύναται να πραγματοποιείται είτε με οριζόντια διατρήματα (Σχήμα 4-2, αριστερά) όταν αυτή ακολουθεί πλησίον του μετώπου της άνω ημιδιατομής είτε με κατακόρυφα διατρήματα (Σχήμα 4-2, δεξιά) όταν ακολουθεί η όρυξή της μετά την ολοκλήρωση της διάνοιξης της άνω ημιδιατομής. Η διάνοιξη της σήραγγας δύναται να επιταχυνθεί με τη σύγχρονη προχώρηση πολλών μετώπων, όπως συγχρόνως από τα δύο στόμια ή σε περίπτωση δίδυμης σήραγγας και από τα τέσσερα στόμια. Σε πολύ μεγάλες σήραγγες η κατασκευή δύναται να πραγματοποιείται και από ενδιάμεσα μέτωπα, η πρόσβαση στα οποία επιτυγχάνεται από εγκάρσιες στοές ή φρέατα.

Η διαδικασία της ανατίναξης εμπεριέχει τα πέντε πρώτα στάδια (α-ε) του κύκλου, που ξεκινούν με τη σήμανση των διατρημάτων και καταλήγουν στην πυροδότηση των υπονόμων. Η επιτυχής εκτέλεσή τους απαιτεί την ορθή επιλογή εξοπλισμού για τη διάτρηση-γόμωση του πετρώματος (που συνήθως επιλέγεται να είναι κατάλληλος και για την ήλωσή του) και των κατάλληλων υλικών για την ανατίναξη. Μετά την ανατίναξη ακολουθούν τα επόμενα τέσσερα στάδια (ς-θ) που τελικό σκοπό έχουν τη σταθεροποίηση του εξορυχθέντος υπόγειου ανοίγματος. Η επιτυχής εκτέλεσή τους απαιτεί κατ' ελάχιστον την ορθή επιλογή συστήματος αερισμού, φορτωτή και επαρκούς αριθμού φορτηγών ή άλλων μέσων μεταφοράς, και μηχανής εκτοξευόμενου σκυροδέματος.



(α) Με οριζόντια διατρήματα (TAMROCK, 1997).



(β) Με κατακόρυφα διατρήματα

Σχήμα 4-2. Διάνοιξη βαθμίδα

4.2.1 Εξοπλισμός διάτρησης

Η όρυξη των διατρημάτων στο πέτρωμα επιτυγχάνεται κυρίως με κρουστική διάτρηση. Αυτή επιτυγχάνονταν αρχικά με πνευματικά συστήματα. Με την εισαγωγή υδραυλικών συστημάτων (Whittaker & Frith, 1990), κατά τα μέσα της δεκαετίας του 1970, αυξήθηκαν θεαματικά η ισχύς κρούσης και οι ρυθμοί διάτρησης. Σε σχέση με την πνευματική διάτρηση, η υδραυλική έχει: (α) Μειωμένο κόστος διατρητικών στελεχών ανά μονάδα μήκους διατρήματος, (β) Χαμηλότερο ενεργειακό κόστος, (γ) Μικρότερη στάθμη γενικά θορύβου, (δ) Βελτίωση της ορατότητας στο χώρο εργασίας λόγω απουσίας των αερίων της εξάτμισης τα οποία παράγουν

νέφος, (ε) Αυξημένη δυνατότητα αυτοματοποίησης και ελέγχου από απόσταση, (ς) Δυνατότητα γρήγορης αντίδρασης στις αλλαγές των συνθηκών διάτρησης. Εντούτοις, η πνευματική διάτρηση προσφέρει τα πλεονεκτήματα της απλότητας στη λειτουργία και της αξιοπιστίας, και επειδή ο πιεσμένος αέρας εξακολουθεί να αποτελεί συνήθη μορφή παροχής ισχύος στη σηραγγοποιία, η πνευματική διάτρηση εξακολουθεί να αποτελεί επιλογή για συμπληρωματικές εργασίες.

4.2.1.1 Περιορισμοί από τις διαστάσεις

Ο εξοπλισμός διάτρησης είναι είτε χειροκίνητος, όπως π.χ. αερόσφυρες στηριζόμενες σε εκτεινόμενη βάση (Σχήμα 4-3, αριστερά), είτε μηχανοκίνητος, όπως π.χ. υδραυλικές σφύρες στηριζόμενες σε βραχίονες που μεταφέρονται επάνω σε αυτοκινούμενα φορεία. Τα φορεία δύνανται είτε να κινούνται επάνω σε τροχιές είτε να είναι ελαστικοφόρα. Τα πρώτα κινούνται είτε επάνω στις τροχιές των βαγονέτων αποκόμισης είτε έχουν απομακρυσμένα σκέλη που κινούνται σε πρόσθετες τροχιές, έτσι ώστε οι υπόλοιπες εργασίες να μπορούν να γίνονται κάτω από το ενδιάμεσο άνοιγμα. Στο Σχήμα 4-3β φαίνεται το ελαστικοφόρο αυτοκινούμενο φορείο BOOMER H175 της ATLAS COPCO, με τρεις βραχίονες διάτρησης και ένα δάπεδο εργασίας, κατάλληλο για διάνοιξη από σταθερή θέση της άνω ημιδιατομής συνήθους σήραγγας.



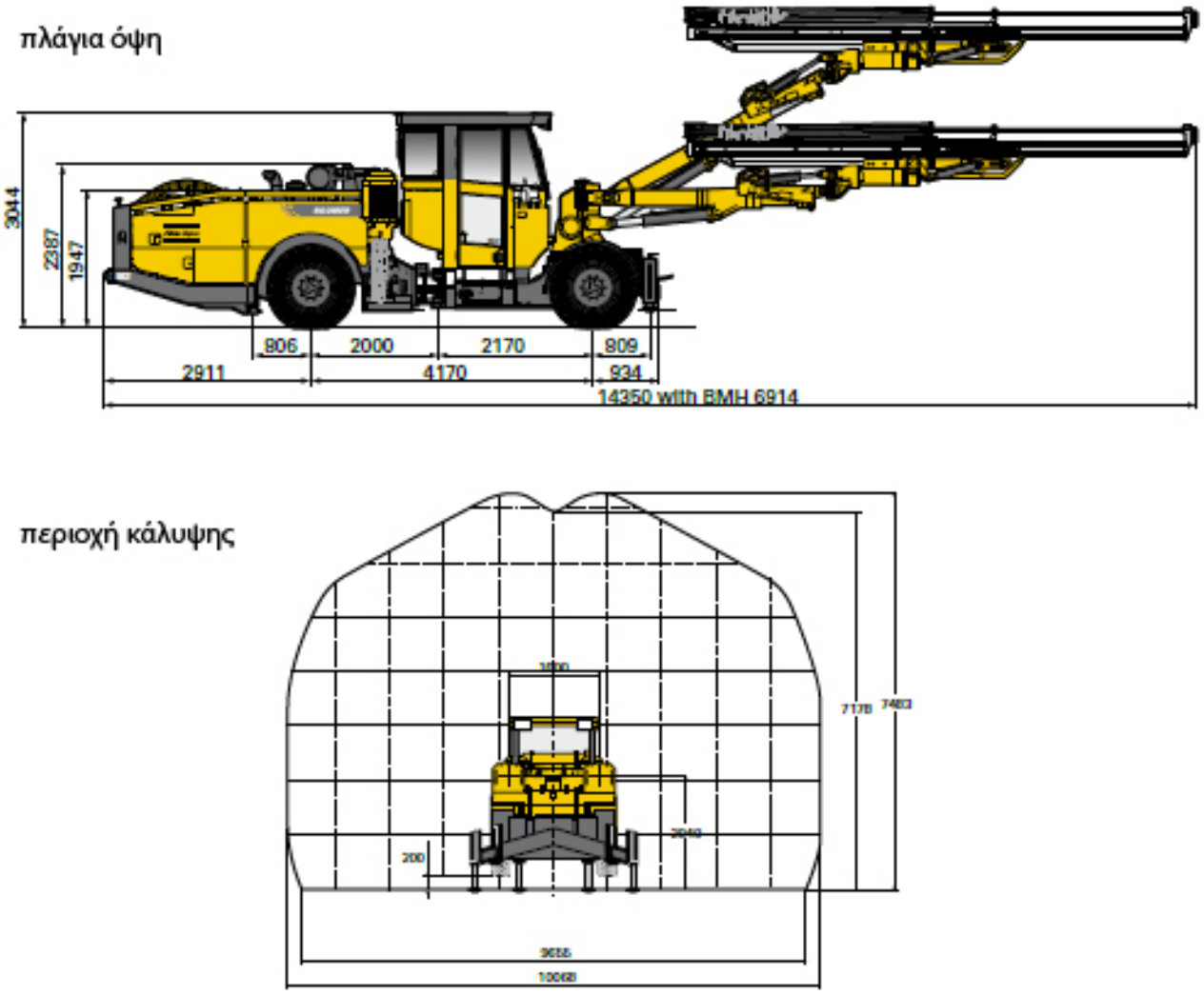
(α) Χειρωνακτική διάτρηση (TBG & STUVA, 1989)



(β) Εκμηχανισμένη διάτρηση (Anonymous)

Σχήμα 4-3. Όρυξη διατρημάτων για την ανατίναξη του μετώπου

Η επιλογή του εξοπλισμού πρέπει να επιτρέπει στα διατρητικά στελέχη να καλύπτουν το σύνολο της διατομής της σήραγγας. Προς τούτο οι κατασκευαστές των μηχανών διάτρησης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-4, δίνουν στοιχεία των δυνατοτήτων κάλυψης του μετώπου από κάθε μηχανή.

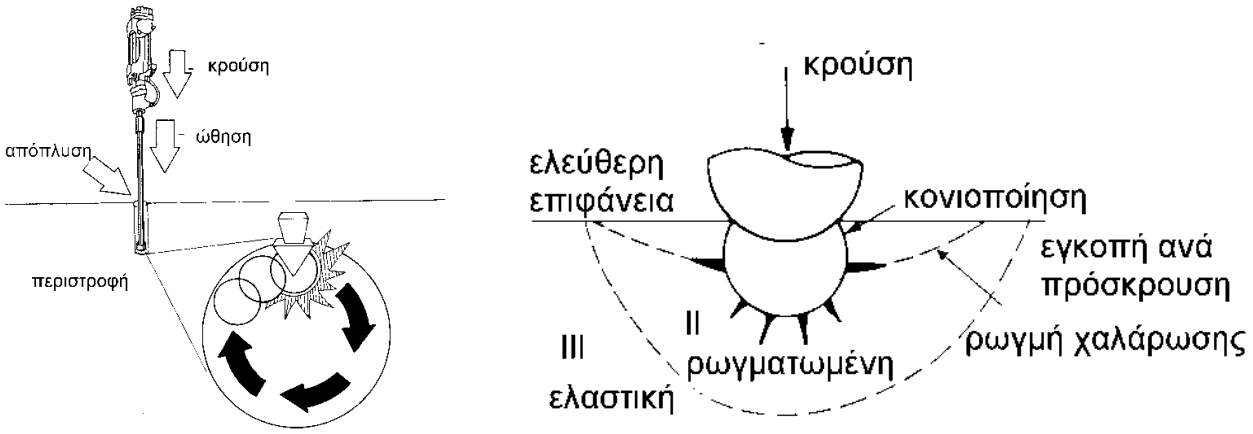


Σχήμα 4-4. Διαστάσεις μετώπου προσβολής από το Boomer M2 C εξοπλισμένο με COP 3038 της Atlas Copco

4.2.1.2 Επίδοση κοπτικών

Τα πυριγενή πετρώματα είναι συνήθως σκληρά και συμπαγή και διατρώνται κρουστικά (Whittaker & Frith, 1990), εκτός εάν είναι κατακερματισμένα ή αποσαθρωμένα. Η αντοχή των ιζηματογενών πετρωμάτων ποικίλει σε μεγάλο εύρος, όπως π.χ. τα ασβεστολιθικά, με την κρητίδα (κιμωλία) στο ένα άκρο και το σκληρό παλαιοζωικό ασβεστόλιθο στο άλλο. Στα μηχανικά ασθενέστερα ιζηματογενή πετρώματα η κρουστική διάτρηση γίνεται με ευκολία, μολονότι συχνά είναι δυνατή και η περιστροφική. Η διάστρωση τους μπορεί να παρεκκλίνει τη διάτρηση. Τα μεταμορφωμένα έχουν μέτρια έως πολύ μεγάλη σκληρότητα και συχνά είναι ιδιαίτερα φθοροποιά.

Στα υπόγεια έργα η κρουστική διάτρηση των πετρωμάτων επιτυγχάνεται από διατρητικές κεφαλές που έχουν διάμετρο 38 έως 48mm και εμπεριέχουν καρβίδια βολφραμίου, που βιδώνονται στα άκρα στελεχών διαμέτρου 32mm (Whittaker & Frith, 1990). Η προχώρηση τους περιλαμβάνει: κρούση, ώθηση, περιστροφή και απόπλυση (Σχήμα 4-5α). Το πέτρωμα κατά την κρούση θρυμματίζεται λόγω τοπικής σύνθλιψης. Γύρω από τη συντριμμένη ζώνη αναπτύσσεται μία ζώνη θραύσης (Σχήμα 4-5β). Η αποκόλληση θραυσμάτων συμβαίνει ως δευτερογενές φαινόμενο. Η ποσότητα των λεπτομερών και η κατανομή του μεγέθους τους επηρεάζουν την κατανάλωση ενέργειας κατά τη διάτρηση και επομένως την απόδοση της διαδικασίας διάτρησης. Η μειωμένη παραγωγή λεπτομερών συμβαδίζει με την αύξηση της απόδοσης της διάτρησης.



(α) Λειτουργία διατρητικού στελέχους *(β) Μηχανισμός θραύσης*

Σχήμα 4-5. Μηχανισμός διάτρησης (TAMROCK, 1997)

Τη συμπεριφορά της διάτρησης (Whittaker & Frith, 1990) επηρεάζουν: η δυσθραυστότητα του πετρώματος που τείνει να μειώνει την ταχύτητα στροφής με αποτέλεσμα τη θραύση των στελεχών, η αποξεστικότητα του πετρώματος που επηρεάζει το βαθμό φθοράς των κοπτικών, οι ανοικτές ρωγμές και διακλάσεις που προκαλούν συχνά παγίδευση μέσα στο διάτρημα των διατρητικών στελεχών, τα προβλήματα απόπλυσης στα μαλακά πετρώματα, και η απαίτηση ισχυρής κρούσης στα σκληρά πετρώματα. Στα κατακερματισμένα πετρώματα, το μήκος του διατρήματος επηρεάζει ιδιαίτερα τη διάτρηση. Η επίδοση της διάτρησης χαρακτηρίζεται από την ταχύτητα της και τη φθορά στα κοπτικά.

Διατρησιμότητα

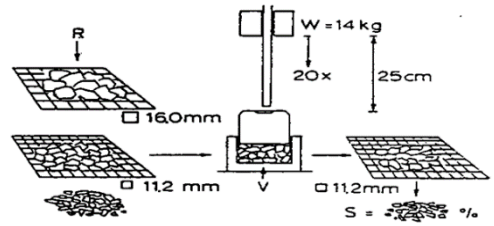
Η διαδικασία θραύσης του πετρώματος κατά τη διάτρηση είναι συνδυασμός παραγόντων (TAMROCK, 1977), όπως: εγκοπή στο πέτρωμα από το κοπτικό, δημιουργία θραυσμάτων, πλήθος θραυσμάτων, δευτερεύων θρυμματισμός. Επομένως, αυτή είναι συνάρτηση διαφορετικών ιδιοτήτων του πετρώματος, όπως: ορυκτολογική σύσταση, επιφανειακή σκληρότητα, αντοχή κόκκων, σύνδεση κόκκων, πορώδες. Μολονότι η γεωλογική ταξινόμηση των πετρωμάτων, με βάση τη γένεση, περιεκτικότητα ορυκτών και δομή είναι χρήσιμη ως δείκτης της αντοχής τους, λίγες μόνο πληροφορίες παρέχει για την ευκολία διείσδυσης του κοπτικού στο πέτρωμα, που σε σκληρά πετρώματα μπορεί να είναι της τάξης των 1.2 m/min.

Η διατρησιμότητα της βραχομάζας, στην απλούστερη μορφή της, ορίζεται ως ένας αναλογικός συντελεστής του καθαρού ρυθμού διείσδυσης ή της ειδικής ενέργειας διάτρησης. Ωστόσο, η ειδική ενέργεια συνδέεται στενά με τη συσκευή ή τον εξοπλισμό διάτρησης με τον οποίο προσδιορίστηκε. Τρεις ομάδες δοκιμών, που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της διατρησιμότητας της βραχομάζας με σκοπό την πρόβλεψη της επιτόπου επίδοσης, δίνονται (TAMROCK, 1999) παρακάτω:

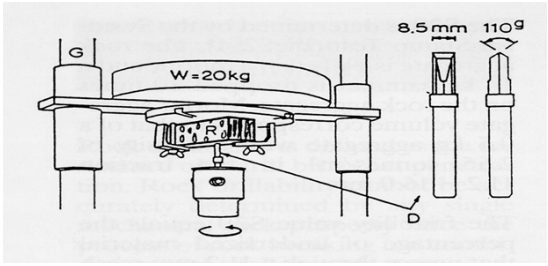
(α) Καταγραμμένα ιστορικά στοιχεία καθαρής προχώρησης δεδομένου εξοπλισμού και κοπτικών σε σχέση με πρότυπο πέτρωμα, όπως π.χ. ο γρανίτης του Barre.

(β) Καταγραμμένα ιστορικά στοιχεία προχώρησης και ισχύος δεδομένου εξοπλισμού και κοπτικών, επεξεργασμένα ως ειδική ενέργεια κοπής, για συσχετισμό της με μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος, όπως θλιπτική αντοχή, εφελκυστική αντοχή προερχόμενη από βραζιλιανή δοκιμή και δείκτη σημειακής φόρτισης.

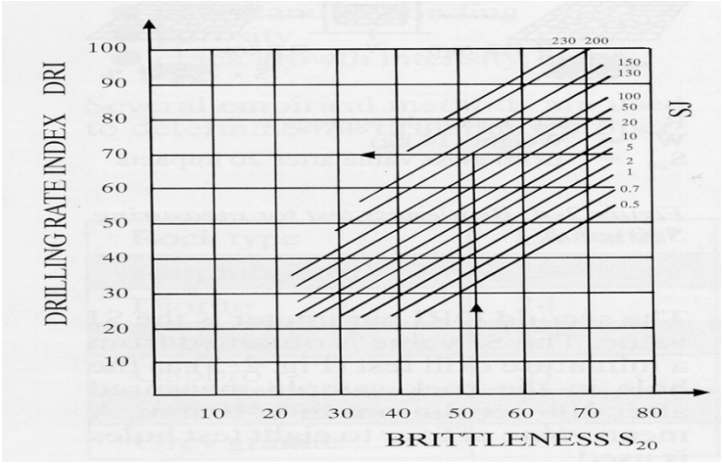
(γ) Πρότυπες δοκιμές κρούσης σε δοκίμια άρρηκτου πετρώματος ή θραυσμάτων του, υπό περιορισμό. Λόγω της φύσης των δοκιμών, αντιπροσωπεύουν τη σχετική ενέργεια που απαιτείται για να θραύσουν δεδομένο όγκο πετρώματος, και να επιτρέψουν το συσχετισμό της συμπεριφοράς της επιτόπου διάτρησης με τις τιμές των δεικτών των εργαστηριακών δοκιμών. Οι συνηθέστερες δοκιμές είναι ο δείκτης ρυθμού διάτρησης DRI, η κατά Protodyakonov σκληρότητα του πετρώματος f (0.3 ÷20), και ο βαθμός σκληρότητας κρούσης του πετρώματος RIHN. Ο δείκτης διατρησιμότητας DRI (15 ÷145) βασίζεται σε δύο δείκτες (Σχήμα 4-6γ) που μετρώνται εργαστηριακά: το δείκτη S_{20} (Σχήμα 4-6α) που αφορά την ψαθυρότητα του πετρώματος και το δείκτη SJ του Sievers (Σχήμα 4-6β) που αφορά την αντίσταση στην περιστροφική διάτρηση. Η διατρησιμότητα χαρακτηρίζεται εξαιρετικά χαμηλή για DRI=21, πολύ χαμηλή για DRI=28, χαμηλή για DRI=37, μέτρια για DRI=49, υψηλή για DRI=65, πολύ υψηλή για DRI=86, και εξαιρετικά υψηλή για DRI=114. Ο δείκτης είναι φθίνουσα συνάρτηση της μονοαξονικής αντοχής του πετρώματος, και διαγράμματα συσχέτισης (π.χ. TAMROCK, 1999) δίνονται από κατασκευαστές εξοπλισμού, για διάφορους τύπους πετρωμάτων.



(α) Δείκτης ψαθυρότητας S_{20}



(β) Δείκτης (περιστροφικής διείσδυσης) SJ



(γ) Διάγραμμα εκτίμησης του δείκτη ρυθμού διάτρησης

Σχήμα 4-6. Δείκτης ρυθμού διάτρησης (DRI)

Αποξεστικότητα πετρώματος

Ως αποξεστικότητα (ή λειαντικότητα-abrasion) του πετρώματος (TAMROCK, 1999) ορίζεται η μικροσκοπική ή μακροσκοπική αφαίρεση ή θραύση υλικού της επιφάνειας εργασίας κοπτικού εργαλείου ή άλλως οποιαδήποτε φθορά που μειώνει τη διάρκεια ζωής του κοπτικού. Εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού του κοπτικού άκρου, της βραχομάζας, και τη διάδραση στην επαφή των δύο υλικών υπό δυναμικές συνθήκες. Η φθοροποιός δράση της βραχομάζας είναι συνδυασμός της σκληρότητας και κοκκομετρίας των ορυκτών του πετρώματος, της αντοχής και δυσθραυστότητας του άρρηκτου πετρώματος, του βάθους και ταχύτητας διάτρησης, της ύπαρξης ανώμαλων κρούσεων, του τύπου κοπής, της ύπαρξη ψυκτικών στο μέτωπο κοπής, της αποτελεσματικότητας απομάκρυνσης των θραυσμάτων, και της ανθεκτικότητας του κοπτικού εργαλείου. Δείκτες προσδιοριζόμενοι από εργαστηριακές δοκιμές για τον καθορισμό της φθοροποιού δράσης δειγμάτων πετρώματος, μεταξύ άλλων, είναι: ο δείκτης φθοράς F, ο δείκτης αποξεστικότητας CERCHAR (CAI), ο βαθμός σκληρότητας του πετρώματος Vickers (VHNR, 10 ÷ 2300), και ο δείκτης ζωής κοπτικού CLI. Οι τρεις πρώτοι συσχετίζονται με τις:

$$CAI = 0.6 + 3.32 \cdot F = VHNR/145$$

(4-1)

Ο δείκτης CAI (0 ÷ 7.3)[8] δύναται να θεωρηθεί ως αναλογικά αυξανόμενος με τη μονοαξονική αντοχή του πετρώματος, και κυμαίνεται από πολύ κάτω του 1 για συγκολλημένα με άργιλο ιζηματογενή πετρώματα, έως και πάνω από 7 για ορισμένους χαλαζίτες. Ο δείκτης CLI (Cutter Life Index), (από 16 για αποξεστικά έως ~60 για ελεύθερα χαλαζία), δίνεται από τον τύπο:

$$CLI = 13.84\left(\frac{SJ}{AVS}\right)^{0.3847}$$

(4-2)

όπου AVS η τιμή αποξεστικότητας του χάλυβα (Abrasion Value Steel) σύμφωνα με τη σχετική δοκιμή (Nilsen et al., 2006), η οποία καταγράφει την απώλεια βάρους σε mg κοπτικού από χάλυβα μετά από 20 περιστροφές, σε ένα λεπτό, επί δίσκου στον οποίο κυκλοφορεί σκόνη θρυμματισμένου πετρώματος. Τέλος, ο δείκτης φθοράς (BWI) του κοπτικού άκρου δύναται να εκφραστεί ως συνάρτηση του DRI και είτε της περιεκτικότητας του πετρώματος σε πυριτικά ορυκτά είτε της τιμής AV (Abrasion Value). Στον επόμενο πίνακα συσχετίζονται τιμές των δεικτών που προέκυψαν από δοκιμές.

[8] *Το εύρος τιμών των δεικτών δεν είναι απόλυτο, αλλά συμφωνεί με δημοσιευμένα πειραματικά δεδομένα.*

Πίνακας 4-1. Παραδείγματα δεικτών διάτρησης

Πέτρωμα	S_{20}	SJ	AVS	DRI™	CLI™	BWI	CAI_s	UCS [MPa]	Πυκνότητα [g/cm^3]
Εργαστηριακές δοκιμές των Macias &Dahl (2016)									
Ασβεστόλιθος	53.2	66.7	0.5	63	90.9		2.0	175	2.60
Βασάλτης	34.7	9.2	8.5	34	14.3		3.0	261	2.95
Βασάλτης Xiamen	39.6	3.0	19.5	34	6.8		2.7	279	3.00
Trondhjemite (γρανιτικό)	56.1	3.6	27.5	51	6.3		4.3	196	2.68
Γρανίτης RP	67.4	8.8	38.0	67	7.9		4.5	170	2.63
Γρανίτης Iddefjord	61.9	5.0	31.5	58	6.8		3.4	188	2.60
Γρανίτης GM	60.4	4.5	35.5	56	6.2		4.0	169	2.65
Χαλαζίτης	52.3	1.6	42.2	43	3.9		2.5	359	2.60
Εργαστηριακές δοκιμές σε πετρώματα σήραγγας μεταφοράς υδραυλικού έργου στα υψίπεδα του Lesotho (Bell, 2004)									
Ολιβινικός βασάλτης				40	31	28			
Μη αμυγδαλοειδής βασάλτης				44	28	24			
Πολύ αμυγδαλοειδής βασάλτης				53	57	16			
Εργαστηριακές δοκιμές σε πετρώματα βόρειας σήραγγας υδραυλικού έργου στα υψίπεδα του Lesotho (Bell, 2004)									
Ιλυόλιθος				62	60	21			
Ψαμμίτης				91	23	13			
Δολερίτης				21	16	43			

4.2.2 Διάταξη διατρημάτων – γόμωση

Στη φάση αυτή τα διατρήματα σημειώνονται στο μέτωπο εκσκαφής σύμφωνα με τον κάνναβο της μελέτης, διατρώνται στο επιλεγμένο βάθος, γομώνονται με τις εκρηκτικές ύλες και τα μέσα έναυσης με τους υπολογισμένους χρόνους καθυστέρησης, και στη συνέχεια επιγομώνονται με αδρανές υλικό, όπως άμμος λατομείου ή μίγμα άμμου αργίλου. Η διαδικασία γόμωσης διατρημάτων, κατά τη διάνοιξη τεχνικού έργου, φαίνεται στο Σχήμα 4-7.



Σχήμα 4-7. Γόμωση διατρημάτων στη σήραγγα Καλυδώνας (Ταταράκης, 2012)

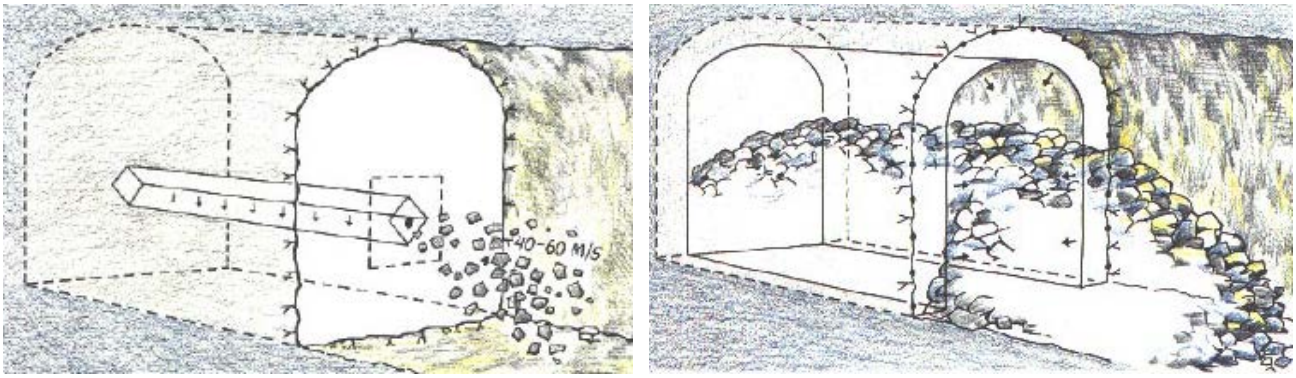
Η διάταξη των διατρημάτων ανατίναξης (blasting pattern) εξαρτάται από τις διαστάσεις της διατομής, το σχήμα της, τη διάμετρο των διατρημάτων, τις γεωλογικές συνθήκες, τη διατρησιμότητα και θραυσιμότητα του πετρώματος, τις αναμενόμενες διαρροές νερού, τη διαθεσιμότητα και τον τύπο εκρηκτικών και πυροδοτητών, το διατρητικό εξοπλισμό, τις τελικές ποιοτικές απαιτήσεις ακρίβειας της διατομής και ομαλότητας της επιφάνειάς της, και τον περιορισμό δονήσεων. Ανάλογα με τις επιτόπου συνθήκες, όλοι ή μέρος των παραπάνω παραγόντων θεωρούνται αρκετά σημαντικοί για τον καθορισμό της διάταξης των διατρημάτων. Με χρήση επιβραδυνομένων μέσων έναυσης οι εκρήξεις σχεδιάζονται να γίνονται διαδοχικά, και σε κάθε επόμενη έκρηξη να υπάρχουν ελεύθερες επιφάνειες που δημιουργήθηκαν από την προηγούμενη. Μολονότι στα περισσότερα μεταλλευτικά και τεχνικά έργα το σχέδιο ανατίναξης υπολογίζεται με το χέρι, υπάρχουν σύγχρονοι προηγμένοι υπολογιστικοί κώδικες, όπως ο iSURE της Sandvik (Kukkonen, 2008), που εφαρμόζονται ευρέως και διευκολύνουν τροποποιήσεις, όπως μεταβολές στη διάταξη, γόμωση, πυροδότηση, και παραγωγή. Τα σύγχρονα μηχανήματα δύνανται, με τον ηλεκτρονικό έλεγχο, να εκτελούν επί τόπου το σχέδιο διάτρησης ταχύτερα και ακριβέστερα (Puhakka, 1988). Η αξιολόγηση της ανατίναξης μετρείται με πέντε δείκτες, ήτοι:

(α) το ποσοστό προχώρησης (pull) σε σχέση το μήκος των διατρημάτων, που είναι ~90÷95%
(β) η ειδική κατανάλωση της εκρηκτικής ύλης, δηλαδή ο λόγος του βάρους της προς το στερεό όγκο του ορυχθέντος πετρώματος,
(γ) η ειδική διάτρηση, δηλαδή ο λόγος του συνολικού μήκους των διατρημάτων προς το στερεό όγκο του ορυχθέντος πετρώματος,
(δ) το ποσοστό της υπέρθραυσης, δηλαδή ο λόγος του όγκου της υπερεκσκαφής προς τον όγκο της χρήσιμης εκσκαφής,
(ε) το βάθος διαταραχής, δηλαδή της ζώνης πέριξ της εκσκαφής όπου το πέτρωμα έχει ρωγματωθεί και έχει μειωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά.

Τα διατρήματα στο μέτωπο (Σχήμα 4-9) διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες με βάση τη σειρά έκρηξής τους, ήτοι σε διατρήματα προεκσκαφής (cut), κύριας εκσκαφής (stope) και περιμέτρου (contour). Με την ανατίναξη των διατρημάτων προεκσκαφής (Σχήμα 4-8α) δημιουργείται ελεύθερη επιφάνεια ανακλάσεως του κρουστικού κύματος από τις εκρήξεις των πέριξ αυτής υπονόμων της κύριας εκσκαφής. Τα διατρήματα της κύριας εκσκαφής εκρήγνυνται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να εξορύξουν το πέτρωμα σε όλη σχεδόν τη διατομή της σήραγγας (Σχήμα 4-8β) αφήνοντας μόνο περιμετρικά μικρό πάχος πετρώματος. Τα περιμετρικά διατρήματα, που υποδιαιρούνται σε διατρήματα οροφής (roof), παρειών (wall) και δαπέδου (lifters), αποσκοπούν στην εξόρυξη της διατομής της σήραγγας με ακρίβεια καθώς και στην αποφυγή της ρωγμάτωσης ή χαλάρωσης του περιβάλλοντος πετρώματος. Ο αριθμός των διατρημάτων και η ειδική κατανάλωση, όπως φαίνεται από το διάγραμμα στο Σχήμα 4-11, εξαρτώνται από το μέγεθος της διατομής. Τα περιμετρικά διατρώνται με μικρή κλίση προς τα έξω, ώστε να είναι δυνατή, κατά τη διάτρηση του επόμενου κύκλου, η τοποθέτηση του τροφοδότη των διατρητικών στελεχών στο όριο της εκσκαφής. Γωνία κλίσης 3^{o} δίνει παρέκκλιση 50mm/m διατρήματος, που δημιουργεί μία μέγιστη υπερεκσκαφή ~100÷200mm.

4.2.2.1 Διατρήματα προεκσκαφής

Η εξόρυξη στα υπόγεια έργα χαρακτηρίζεται από στενότητα κινήσεων και μία μόνο ελεύθερη επιφάνεια ανάκλασης της ανατίναξης, κάθετη στην προχώρηση. Τα διατρήματα προεκσκαφής σκοπό έχουν τη δημιουργία ελεύθερης επιφάνειας παράλληλης στην προχώρηση και κάθετης στη διεύθυνση κύματος της έκρηξης. Αυτά ορύσσονται γενικά στο μέσον του πλάτους του μετώπου και σε ύψος που να διευκολύνει τις εργασίες. Διακρίνονται σε παράλληλα ως προς τον άξονα της σήραγγας και σε υπό γωνία. Η πρώτη κατηγορία βασικά περιλαμβάνει τις διατάξεις τυπικής κυλινδρικής προεκσκαφής, που είναι και η συνηθέστερη σήμερα, και πυκνής διάτρησης. Η δεύτερη περιλαμβάνει τις διατάξεις σφήνας ή V, πυραμίδας και ριπιδίου, οι οποίες όμως σπανίως χρησιμοποιούνται εκτός των ανθρακωρυχείων.



(α) Έκρηξη υπονόμων προεκσκαφής

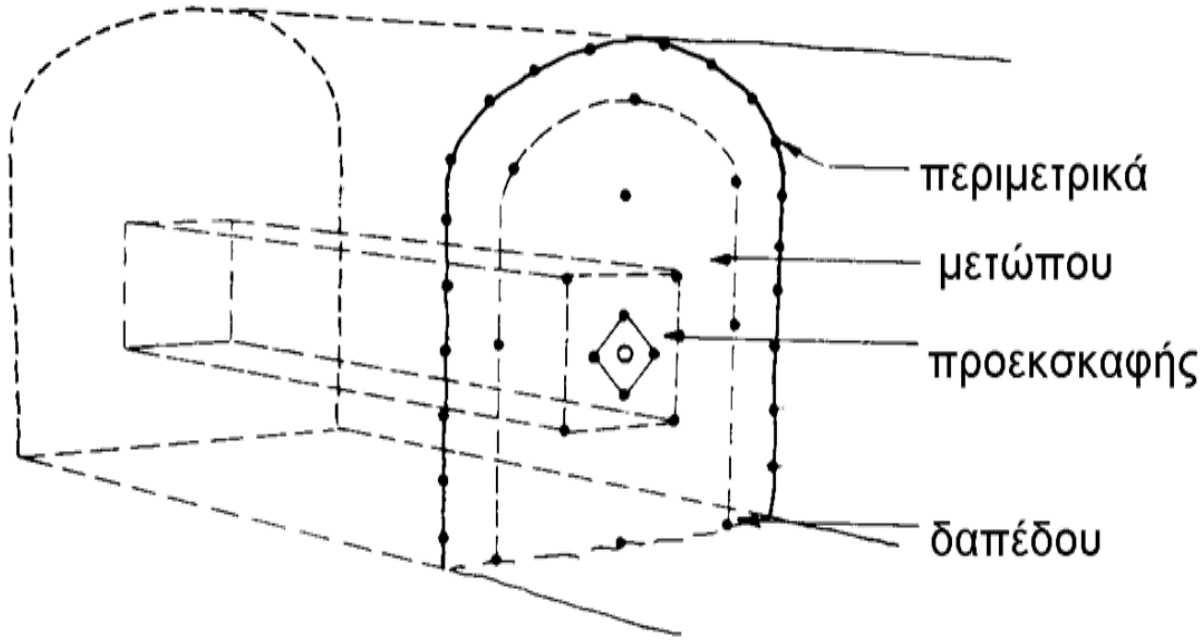
(β) Έκρηξη υπονόμων κύριας εκσκαφής. Διακρίνονται τα περιμετρικά διατρήματα τα οποία θα εκραγούν τελευταία.

Σχήμα 4-8. Διάταξη διατρημάτων.

Οι παράλληλες διατάξεις (Σχήμα 4-9) κάνουν χρήση, κατά την ανατίναξη, κενών διατρημάτων ανακούφισης (relief) που δρουν ως ελεύθερες επιφάνειες ανάκλασης του κρουστικού κύματος από τις γύρω υπονόμους[9]. Τα κενά διατρήματα πρέπει να ανοίγονται σε βάθος 150-300 mm περισσότερο από τα γομωμένα, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται στο βάθος η δημιουργία μίας ελεύθερης επιφάνειας για τη δράση των εκρηκτικών. Η διάνοιξη της προεκσκαφής πραγματοποιείται με τη διαδοχική έκρηξη των γύρω από το κενό διάτρημα υπονόμων που ακολουθείται από εκτόξευση του θραυσθέντος πετρώματος. Οι παράλληλες διατάξεις απαιτούν τη χρήση διαρρηκτικών εκρηκτικών υλών που παρέχουν σημαντικό μέρος της ενέργειάς τους κατά την ωστική φάση (Τσουτρέλης, 2001). Δίνουν γενικά καλύτερο θρυμματισμό και μικρότερη απόσταση εκτόξευσης του θραυσθέντος πετρώματος σε σχέση με τις διατάξεις υπό γωνία. Στην τυπική κυλινδρική προεκσκαφή υπάρχουν ένα ή δύο κενά διατρήματα διαμέτρου από 76 έως 127mm που διανοίγονται με προσαρμογή διευρυντήρα. Τα υπόλοιπα διατρήματα έχουν διάμετρο την ίδια με αυτών της κύριας εκσκαφής. Η διάταξή της αποτελείται από μέχρι 4 επάλληλα τετράγωνα υπό γωνία 45^{o} το ένα μετά το άλλο. Το εξωτερικό τετράγωνο έχει πλευρά από 1.6m έως 2.5m και δύναται να υπολογίζεται ως ίση ή λίγο μεγαλύτερη της τετραγωνικής ρίζας της προχώρησης,

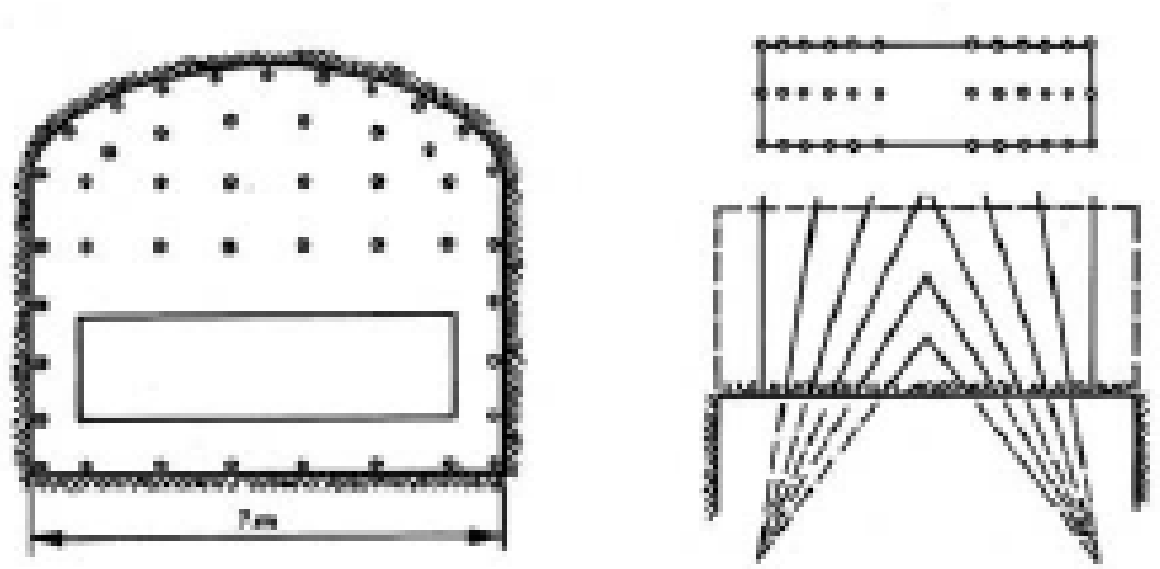
[9] *Το διάτρημα το οποίο έχει γομωθεί με εκρηκτική ύλη, επιγομωθεί, και είναι έτοιμο για έκρηξη*

σε μέτρα, δηλ. για προχώρηση 4m το εξωτερικό τετράγωνο θα πρέπει να έχει πλευρά μεγαλύτερη από 2m, που αντιστοιχεί σε ~4 τετράγωνα. Η προεκσκαφή (burn) πυκνής διάτρησης (Hagan, 1979) στοχεύει επίσης στη δημιουργία ενός κεντρικού κυλινδρικού ανοίγματος στο πέτρωμα. Όλα τα διατρήματα της είναι παράλληλα, εγγύς διαταγμένα, και της αυτής διαμέτρου με αυτά της κύριας εκσκαφής, ένα δε ή περισσότερα από αυτά παραμένουν κενά. Η διάταξη αυτή χρησιμοποιείται για σήραγγες με διάμετρο έως 5.5 m. Η όρυξη παράλληλης προεκσκαφής επιτυγχάνεται επίσης με τη μηχανική διάτρηση οδηγού στοάς εντός της κύριας σήραγγας η οποία λειτουργεί ως ελεύθερη επιφάνεια της έκρηξης, με τα λοιπά διατρήματα να είναι αυτά της παράλληλης διάτρησης. Τα εκρηκτικά υλικά δύνανται να είναι είτε φυσίγγια είτε χύμα γαλακτώματα ή και συνδυασμοί (Mather, 1999), και οι χρόνοι καθυστέρησης κυμαίνονται από 75 έως 500ms.



Σχήμα 4-9. Παράλληλη προεκσκαφή (Karanam and Misra, 1998)

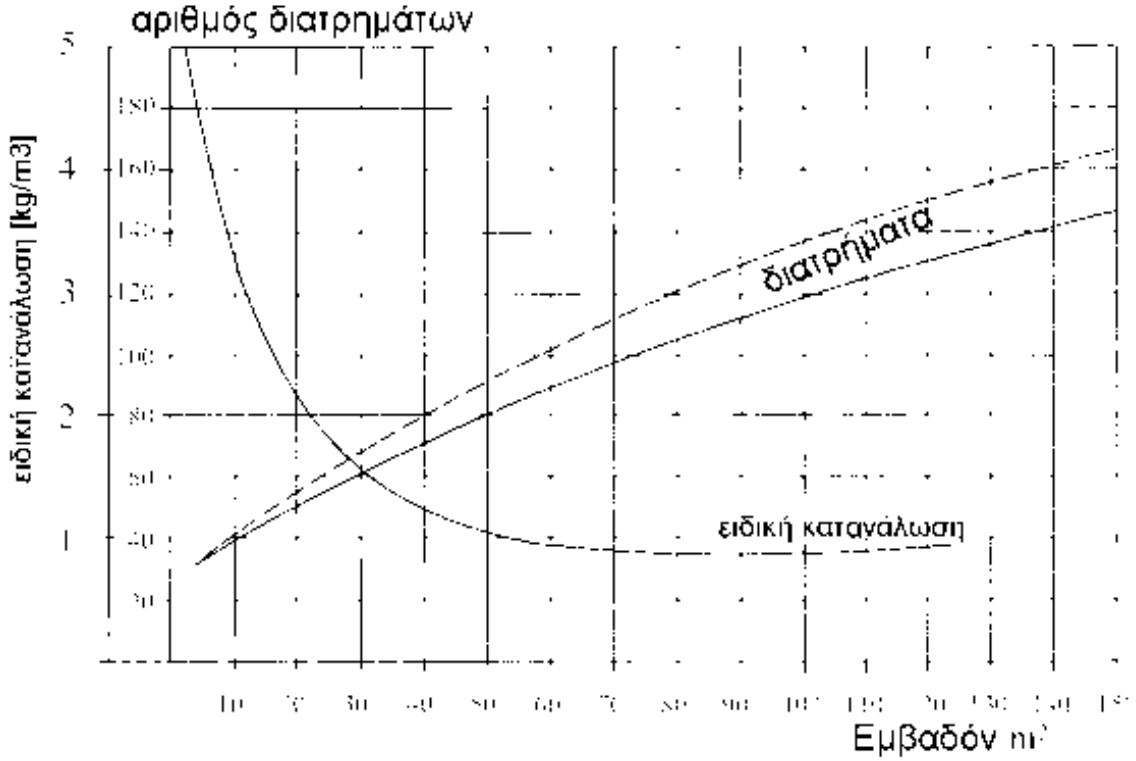
Οι υπό γωνία διατάξεις εκμεταλλεύονται μερικώς την ύπαρξη του μετώπου ως ελεύθερης επιφάνειας ανάκλασης του κύματος της έκρηξης. Η προεκσκαφή V (Σχήμα 4-10) αποτελείται από συμμετρικά υπό γωνία διατρήματα. Έχει χάσει μέρος από την εφαρμογή της (TAMROCK, 1999) με την ευρεία διάδοση της παράλληλης προεκσκαφής και των βημάτων μεγάλου μήκους. Εντούτοις, εξακολουθεί να χρησιμοποιείται σε μεγάλες διατομές σηράγγων, όπου το πλάτος δεν θέτει περιορισμό στη διάτρηση. Η προεκσκαφή αυτή απαιτεί ελαφρώς λιγότερα μήκη διάτρησης από την παράλληλη προεκσκαφή, που της δίνει ένα πλεονέκτημα στις μεγάλες σήραγγες. Βασίζεται στις αρχές των υπαίθριων ανατινάξεων στις οποίες η γωνία διαστολής του πετρώματος είναι ίση ή υπερβαίνει τις 90 μοίρες. Η γωνία κορυφής των διατρημάτων προεκσκαφής δεν πρέπει να είναι μικρότερη από 60^{o}. Η εφαρμογή της σωστής γωνίας αποτελεί κύρια δυσκολία στη διάτρηση και η σωστή γωνία διάτρησης περιορίζει το μήκος του βήματος στις στενές σήραγγες. Στις στενές σήραγγες, η προχώρηση ανά κύκλο μπορεί να είναι μικρότερη από το ένα τρίτο του πλάτους τους, το οποίο αυξάνει τον αριθμό κύκλων και τα μέτρα διάτρησης. Αντίθετα, σε πλατιές σήραγγες, η λοξή διάτρηση πραγματοποιείται εύκολα από τα σύγχρονα μηχανήματα, χωρίς να περιορίζεται το μήκος του βήματος. Η προεκσκαφή αποτελείται κανονικά από δύο V αλλά για βαθύτερα βήματα η προεκσκαφή μπορεί να αποτελείται από τρία ή και τέσσερα V. Κάθε V στην προεκσκαφή πρέπει να εκρήγνυται με τον ίδιο αριθμό διαστήματος από καψύλλια MS ώστε να εξασφαλίζεται συντονισμός μεταξύ των υπονόμων όσον αφορά τη θραύση. Δεδομένου ότι κάθε V ανατινάζεται ως μία οντότητα το ένα μετά το άλλο, η καθυστέρηση μεταξύ των διαφορετικών V πρέπει να είναι της τάξης των 50ms ώστε να επιτρέπεται χρόνος για μετατόπιση και διαστολή.



Σχήμα 4-10. Προεκσκαφή V (TAMROCK, 1999)

4.2.2.2 Διατρήματα κύριας εκσκαφής

Τα χρησιμοποιούμενα διατρήματα κύριας εκσκαφής είναι διαμέτρου 32 έως 50 mm με συνηθέστερα εκείνα μεταξύ 42 και 46 mm. Το βάθος των διατρημάτων, για παράλληλη διάταξη, κυμαίνεται συνήθως από 3 έως 5m με συνηθέστερα τα 4m. Η επιτυγχανόμενη προχώρηση (pull) είναι της τάξης του 90% του βάθους των διατρημάτων. Ο αριθμός των διατρημάτων του μετώπου εξαρτάται από το μέγεθος και σχήμα της διατομής, το είδος του πετρώματος και τον επιδιωκόμενο βαθμό θρυμματισμού του, τη διάμετρο και τη διάταξη των διατρημάτων. Αύξηση της διαμέτρου των διατρημάτων συνεπάγεται μείωση του απαιτούμενου αριθμού τους, με αποτέλεσμα γενικά τη μείωση του χρόνου διάτρησης, αλλά την αύξηση του μεγέθους των θραυσμάτων της ανατίναξης και των απαιτήσεων στήριξης. Ο αριθμός των διατρημάτων ανά μονάδα επιφανείας μετώπου αυξάνεται με τη μείωση της διατομής με τη μείωση της διαμέτρου τους, καθώς και με την αύξηση της σκληρότητας του πετρώματος. Η απόσταση μεταξύ των διατρημάτων κυμαίνεται μεταξύ 0.4 και 1.25m, και οι χρόνοι καθυστέρησης κυμαίνονται μεταξύ 100 και 500ms (Mather, 1999). Το Σχήμα 4-11 και ο Πίνακας 4-2 δίνουν προσεγγιστικά, την ειδική κατανάλωση και τον αριθμό των διατρημάτων σα συνάρτηση του εμβαδού του μετώπου.



Σχήμα 4-11. Ειδική κατανάλωση και αριθμός διατρημάτων σε σχέση με το εμβαδόν διατομής σήραγγας, για ελεγχόμενη περιμετρική ανατίναξη (TAMROCK, 1997).

Πίνακας 4-2. Απαιτούμενος αριθμός διατρημάτων και ειδική κατανάλωση (Whittaker & Frith, 1990)

Διατομή σήραγγας [m^2]	**Μαλακό ή έντονα διακλασμένο πέτρωμα**		**Σκληρό ή συμπαγές πέτρωμα**	
	Αριθμός διατρημάτων	**Ειδική κατανάλωση [kg/m^3]**	**Αριθμός διατρημάτων**	**Ειδική κατανάλωση [kg/m^3]**
10	23 ÷ 27	1 ÷ 4	35 ÷ 50	5 ÷ 7
25	45 ÷ 50	1 ÷ 2.5	60 ÷ 70	4 ÷ 5
50	75 ÷ 85	1 ÷ 2	95 ÷ 110	3 ÷ 4

Ως εκρηκτικά χρησιμοποιούνται χημικές ύλες, όπως το ANFO[10], τα slurries[11], τα γαλακτώματα[12], και οι ζελατίνες[13]. Η καταλληλότητά τους εξαρτάται από τη σχέση της ποιότητας της βραχομάζας με το βαθμό (θραυστικότητας, - Τσουτρέλης, 2001) διαρρηκτικότητάς (brisance) τους. Εκρηκτικές ύλες με ταχύτητες εκτόνωσης (vod – velocity of detonation) κάτω των 2500m/s χαρακτηρίζονται ως χαμηλής διαρρηκτικότητας, και πάνω από 5000m/s ως υψηλής. Στο Σχήμα 4-12, η ποιότητα της βραχομάζας εκφράζεται στους δύο άξονες από την αντοχή της και το βαθμό τεκτονισμού της. Το διάγραμμα είναι διαχωρισμένο σε ζώνες καταλληλότητας εκρηκτικών. Παρατηρούμε ότι το ANFO, που στα συνήθη διατρήματα κάτω των 50mm είναι χαμηλής (<2500m/s) διαρρηκτικότητας, είναι κατάλληλο για ένα ευρύ φάσμα ποιοτήτων βραχομάζας. Συνηθέστερα όμως χρησιμοποιείται στις ρωγματωμένες και πορώδεις. Σε ισχυρότερα και πιο συμπαγή πετρώματα απαιτούνται εκρηκτικά υψηλότερης διαρρηκτικότητας, όπως slurries (vod≈3500m/s), ALANFO, και εκρηκτικές ύλες (Τσουτρέλης, 1997) της οικογένειας των δυναμίτιδων (NG based explosives), όπως αμμωνιοδυναμίτιδες (vod≈3500m/s). Στα πολύ ισχυρά και συμπαγή πετρώματα απαιτείται η χρήση υψηλής διαρρηκτικότητας slurries ή ζελατινοδυναμίτιδων[14] (vod≈6100m/s).

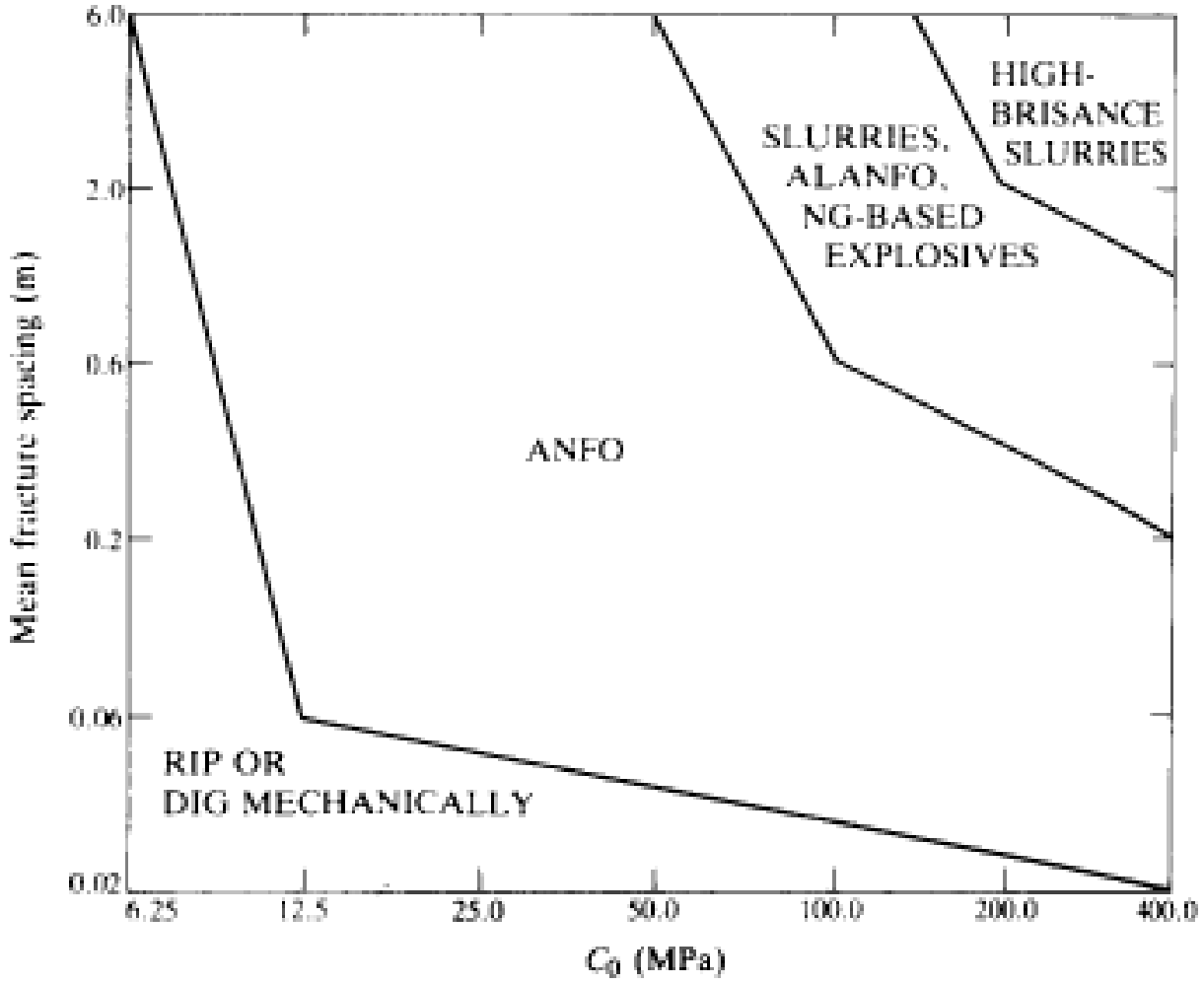
[10] *Μίγμα νιτρικού αμμωνίου 94% με πετρέλαιο εσωτερικής καύσης.*

[11] *Λέγονται και υδραμμωνίτες. Κολλοειδές μίγμα οξειδωτικού κυρίως νιτρικού αμμωνίου, με καύσιμη ύλη-ευαισθητοποιητή TNT ή αργίλιο, νερού, και φυτικής κόλλας.*

[12] *Εγκλωβισμένος αέρας, σε υπερκορεσμένο υδατικό διάλυμα οξειδωτικού κυρίως νιτρικού αμμωνίου, αιωρούμενος ως μικροσκοπικά σφαιρίδια περιτριγυρισμένα από διάσπαρτο καύσιμο πετρέλαιο ή παραφίνη.*

[13] *Μίγματα νιτρογλυκερίνης και νιτροκυτταρίνης.*

[14] *Μίγμα νιτρογλυκερίνης, νιτρικού αμμωνίου, νιτρικού καλίου, δινιτροτολουόλης και πολύ μικρής ποσότητας νιτροκυτταρίνης.*



Σχήμα 4-12. Σχέση καταλληλότητας εκρηκτικών και ποιότητας βραχομάζας (Brady & Brown, 2005)

Οι ζελατινοδυναμίτιδες (TAMROCK, 1997) χρησιμοποιούνται συνήθως στα τεχνικά έργα, σπάνια όμως στα μεταλλευτικά. Ο Πίνακας 4-3 δίνει παράδειγμα χρήσης τους σε τεχνικό έργο οδοποιίας. Τα ANFO, όπως και τα γαλακτώματα και τα (υδραμμωνίτες), θεωρούνται ασφαλέστερα εκρηκτικά από τις παραδοσιακές δυναμίτιδες. Όμως, η αντίσταση του ANFO στο νερό είναι μικρή, και δεν είναι κατάλληλο για κεκλιμένα διατρήματα που περιέχουν νερό. Στα τεχνικά έργα το ANFO παρέχεται έτοιμο από προμηθευτές εκρηκτικών. Τα slurries απαιτούν ισχυρή έναυση από εκρηκτικά όπως δυναμίτιδες. Τα γαλακτώματα είναι εύχρηστα, ασφαλή και ανθεκτικά στο νερό.

Η ποιότητα των καπνών της ανατίναξης, δηλαδή οι χημικές ουσίες που περιέχονται στα παραγόμενα αέρια της έκρηξης, καθορίζουν την ποιότητα του αέρα στο χώρο εργασίας μετά την ανατίναξη. Επίσης, οι χημικές ιδιότητες του ίδιου του εκρηκτικού, και της λιθολογίας στην οποία πρόκειται να χρησιμοποιηθεί, μπορεί να παρουσιάζουν προβλήματα ασφάλειας, όπως για παράδειγμα, μερικά θειούχα μεταλλεύματα υπόκεινται σε ταχεία, εξώθερμη οξείδωση κατά την επαφή με το νιτρικό αμμώνιο.

Πίνακας 4-3. Σχέδιο ανατίναξης στη σήραγγα Καλυδώνας (Ταταράκης, 2012)

Διατρήματα:	**Άνω ημιδιατομή**						**Βαθμίδα**
	Κενό	**Προεκσκαφής**	**Διεύρυνσης (παράλληλα)**	**Κύρια εκσκαφή**	**Δαπέδου**	**Περιμέτρου (λείων τοιχωμάτων)**	
Αριθμός διατρημάτων	1	4÷6	2×4	4 σειρές	14	70÷75	12÷15 οριζόντια
Διάμετρος [mm]	76	45	45	45	45	76	64
Απόσταση σειρών (burden) [m]		0.115÷0.125		0.90÷1.00		0.70	
Απόσταση στη σειρά [m]			0.65÷0.68 1.00÷1.20	1.10÷1.25		0.25÷0.30	
Γόμωση (kg/m)		1.4÷1.6	2.3÷2.6	3.2÷3.5	3.5÷4.0	0.7÷0.8 1 παρά 1 γομωμένο	
Εκρηκτικό		Ζελατινο-δυναμίτιδα 30%	Ζελατινο-δυναμίτιδα 30%	Ζελατινο-δυναμίτιδα 30% & αμμωνίτιδα 38mm×400mm	Ζελατινο-δυναμίτιδα 30%	Αμμωνίτιδα[15] 30mm×200mm ή και γαλάκτωμα	
Συνολικά:	Εμβαδόν: ~$0.5\times\pi\times6.50^2=66m^2$, 125÷130 διατρήματα, 0.35÷0.55kg/m^3, προχώρηση 2.5m, πυροδότηση μη ηλεκτρική Non-el.						

4.2.2.3 Διατρήματα περιμέτρου

Γενικά, τα διατρήματα περιμέτρου πρέπει να λαμβάνουν υπόψη ότι η θραύση και η ρωγμάτωση του πετρώματος πέριξ της διατομής πρέπει να είναι περιορισμένες, για λόγους ευσταθείας, διατήρησης της ακεραιότητας του πετρώματος, αποφυγής υπερεκσκαφών, δημιουργίας ομαλής επιφάνειας, και μείωσης των προκαλουμένων δονήσεων. Εφόσον εφαρμοστεί σε αυτά η συνήθης τεχνική ανατίναξης, τότε προκαλείται σημαντική ρωγμάτωση και υπερεκσκαφή του πετρώματος πέριξ της διατομής, απαίτηση βαρύτερης υποστήριξης, και δημιουργία ακανόνιστης διατομής. Αντίθετα, με την εφαρμογή μεθόδων ελεγχόμενης ανατίναξης περιορίζονται οι ζώνες έντονου θρυμματισμού και διαταραχής του πετρώματος, καθώς και οι απαιτήσεις ξεσκαρώματος και στήριξης της σήραγγας. Τα διατρήματα, προκειμένου να χαρακτηρίζονται συμβατικά ως ελεγχόμενης ανατίναξης, θα πρέπει, σύμφωνα με την τεχνική προδιαγραφή του ΕΛΟΤ (2012, §5.4), να έχουν διάμετρο μεταξύ 46 και 76 mm (Ο Πίνακας 4-4 δείχνει τη χρήση και μικρότερων διατρημάτων). Τα διατρήματα ορύσσονται σε αποστάσεις μεταξύ τους μικρότερες των 0.6 m και μικρότερες του φορτίου (burden). Οι χώροι απόθεσης ραδιενεργών αποβλήτων, οι θάλαμοι των υπογείων υδροηλεκτρικών σταθμών ενέργειας, οι χώροι υπόγειας αποθήκευσης, αλλά και οι σύγχρονες σήραγγες, απαιτούν τη δημιουργία ομαλών επιφανειών ανατίναξης κατά την εκσκαφή τους, και γι' αυτό πρέπει γενικά να χρησιμοποιούνται μέθοδοι ελεγχόμενης ανατίναξης, όπως της πυκνής διάτρησης και των λείων τοιχωμάτων.

Κατά την μέθοδο της πυκνής (ή γραμμικής) διάτρησης (line drilling) ορύσσεται στην περίμετρο της σήραγγας σειρά πολύ πυκνών διατρημάτων, σε αποστάσεις μεταξύ τους 2÷4 φορές τη διάμετρό τους. Αυτά παραμένουν χωρίς γόμωση και δημιουργούν μια ασυνεχή διαχωριστική επιφάνεια ανάκλασης του κρουστικού κύματος της έκρηξης των διατρημάτων της κύριας εκσκαφής, ώστε να προστατευτεί το περιβάλλον πέτρωμα από την ανατίναξη. Προκειμένου να γίνει συνεχής η επιφάνεια ανάκλασης, μερικά ή όλα τα διατρήματα της πυκνής διάτρησης γομώνονται με συνεχή χαμηλής διαρρηκτικότητας εκρηκτική ύλη και πυροδοτούνται ταυτόχρονα πριν την έκρηξη των πλησιέστερα ευρισκομένων υπονόμων της κύριας εκσκαφής.

Κατά τη μέθοδο περιμετρικής ανατίναξης των λείων τοιχωμάτων (smoothwall blasting) ορύσσονται στην οροφή και τις παρειές της σήραγγας διατρήματα σε μικρότερη απόσταση από τα υπόλοιπα. Αυτά γομώνονται αποζευγμένα με φυσίγγια μικρής διαμέτρου και πυκνότητας, (Πίνακας 4-4) και εκρήγνυνται

[15] *Εμπορική ονομασία της αμμωνιοδυναμίτιδας. Έχει ως βασικές εκρηκτικές ουσίες τα νιτρικό αμμώνιο, νιτρικό νάτριο και νιτρογλυκερίνη.*

τελευταία με ελάχιστη ή καθόλου υστέρηση μεταξύ τους, ώστε να δημιουργούν διατμητικές τάσεις και διαρρήξεις κατά μήκος της περιφέρειας της ανατίναξης. Η ποιότητα των τοιχωμάτων εξαρτάται από το λόγο ζεύξης, ήτοι της διαμέτρου του φυσιγγίου της εκρηκτικής ύλης προς αυτήν του διατρήματος (~30÷50%), το λόγο της απόστασης μεταξύ των διατρημάτων προς το φορτίο (~40÷60%), το χρόνο επιβράδυνσης, και τα δομικά χαρακτηριστικά του πετρώματος. Κατάλληλα εκρηκτικά είναι είτε φυσίγγια μικρής διαμέτρου προϊόντος χαμηλής πυκνότητας είτε απλή ή πολλαπλή εκρηκτική θρυαλλίδα πυρήνα υψηλής ισχύος ή φυσίγγια τοποθετημένα με διάκενα εναυόμενα κατά μήκος από εκρηκτική θρυαλλίδα. Ο Πίνακας 4-4, όπως και ο Πίνακας 4-3, δίνουν χαρακτηριστικά εκρηκτικών υλών που χρησιμοποιούνται στις μεθόδους ελεγχόμενης ανατίναξης κατά τη διάνοιξη σηράγγων,.

Πίνακας 4-4. Χαμηλής ισχύος εκρηκτικές ύλες για εφαρμογή της μεθόδου λείων τοιχωμάτων σε σήραγγες (Τσουτρέλης, 2001, με διαμόρφωση)

Εμπορική ονομασία	Παραγωγός	Διάτρημα	Φυσίγγιο (mm)	Γραμμική πυκνότητα (kg/m)	Φορτίο (burden) [m]	Απόσταση [m]	Είδος
Gurit	Nitro Nobel	25÷32	11	0.08	0.30÷0.45	0.25÷0.35	NG
Gurit	Nitro Nobel	25÷43	17	0.18	0.70÷0.80	0.50÷0.60	NG
Gurit	Nitro Nobel	43÷48	17	0.18	0.80÷0.90	0.60÷0.70	NG
Nabit	Nitro Nobel	51	22	0.38	1.00	0.80	NG
Nabit	Nitro Nobel	64	25	0.52	1.00÷1.10	0.80÷0.90	NG
		32	17	0.22	0.55÷0.75	0.40÷0.60	Ref: Berta
		51	25	0.50	0.80÷1.20	0.65÷0.95	(1990)
	Du Pont	32		0.18÷0.38	0.90	0.60	
	Du Pont	51		0.18÷0.38	1.05	0.75	

Επίσης, ομαλές και αδιατάρακτες επιφάνειες εκσκαφής επιτυγχάνονται και με το συνδυασμό ανατινάξεων και μηχανικών μέσων. Αρχικά η ανατίναξη εξορύσσει το μεγαλύτερο μέρος της διατομής, αφήνοντας άσκαφτο πέτρωμα πλησίον του ορίου της διατομής της σήραγγας. Στη συνέχεια, η μηχανική εκσκαφή του άσκαφτου πετρώματος πραγματοποιείται με λάξευση των παρειών, χρησιμοποιώντας κοπτήρες βράχου με αρθρωτή κεφαλή, που ελαχιστοποιεί ή σχεδόν μηδενίζει την υπερεκσκαφή που θα προκαλούνταν από τις ανατινάξεις.

4.2.3 Πυροδότηση

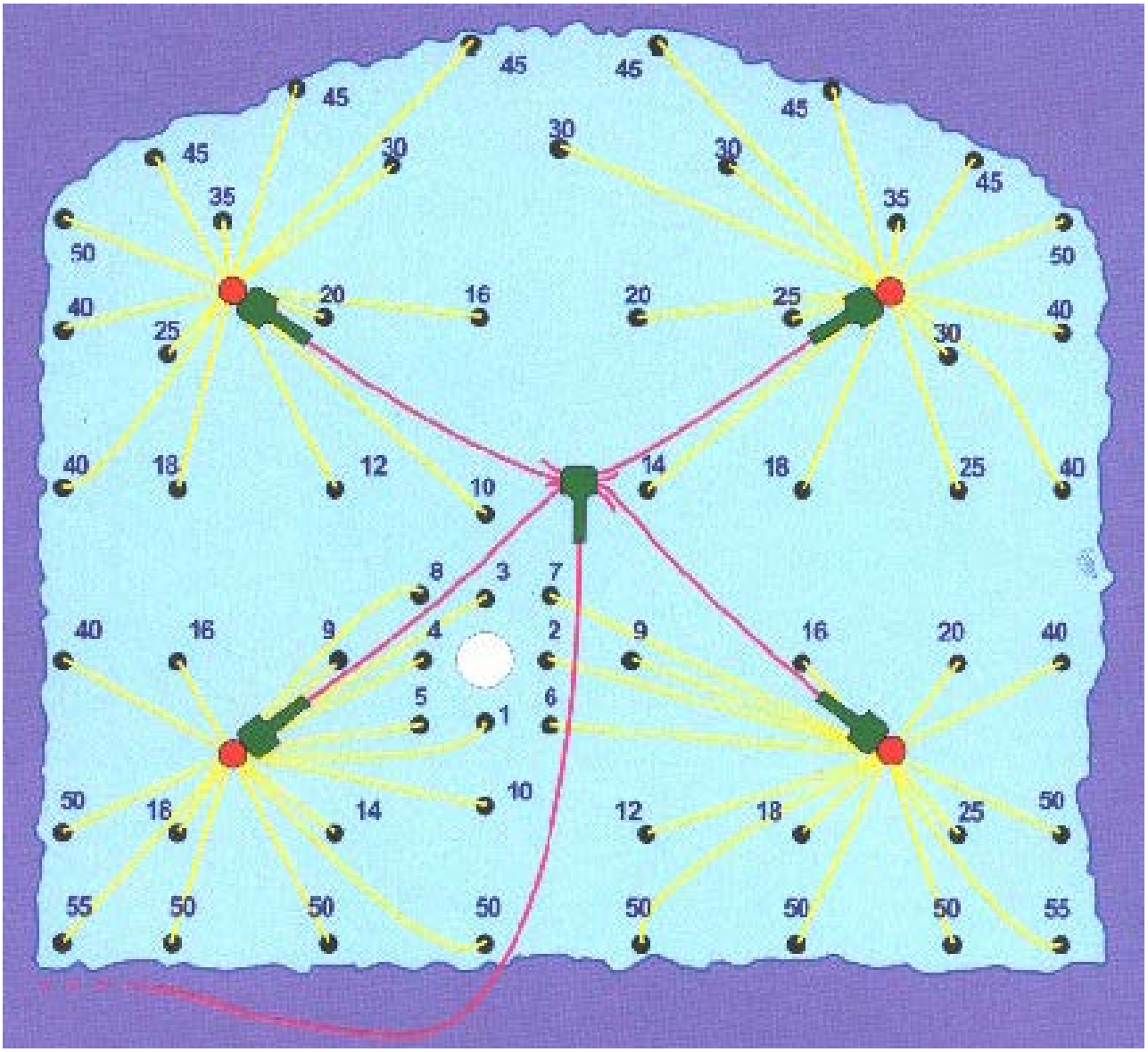
Σε κάθε βήμα προχώρησης οι υπόνομοι εκρήγνυνται με χρονική σειρά από μέσα προς τα έξω. Οι καθυστερήσεις έναυσης επιτυγχάνονται από καψύλλια με επιβράδυνση. Τα καψύλλια έχουν αρίθμηση η οποία αυξάνεται με το χρόνο επιβράδυνσης, ο οποίος μετρείται σε ms. Με την ολοκλήρωση των υπονόμων, οι αγωγοί των καψυλλίων ενώνονται σε συνδέσμους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-13, που καταλήγουν στους πυροδότες. Μετά ο εξοπλισμός και οι εργαζόμενοι απομακρύνονται σε ασφαλή απόσταση από το μέτωπο. Τέλος, από θέση προστατευμένη πυροδοτείται η ανατίναξη του μετώπου. Πρέπει να έχει προσεχθεί, ώστε κατά την ανατίναξη να μην προκληθούν αστοχίες, όπως (Whittaker & Frith, 1990) αποευαισθητοποίηση των εκρηκτικών, συμπαθητική έναυση, ή αναποτελεσματική ανατίναξη.

4.2.3.1 Μέσα πυροδότησης

Διακρίνονται σε ηλεκτρικά και μη ηλεκτρικά. Στα ηλεκτρικά ζεύγος μονωμένων ηλεκτρικών αγωγών συνδέεται με καψύλλιο που περιέχει μίγματα ανάφλεξης, έναυσης και έκρηξης. Με τη διοχέτευση ρεύματος, γέφυρα εντός του καψυλλίου ερυθροπυρώνεται και αναφλέγει μίγμα που την περιβάλλει. Αυτό στη συνέχεια πυροδοτεί εντός του καψυλλίου μίγμα έναυσης που με το ασθενές κρουστικό κύμα του εναύει μίγμα έκρηξης, που στη συνέχεια πυροδοτεί την εκρηκτική ύλη που βρίσκεται στην υπόνομο. Εφόσον απαιτείται καθυστέρηση, κατάλληλο στοιχείο παρεμβάλλεται μεταξύ των στοιχείων ανάφλεξης και έναυσης. Στο μικρό εύρος καθυστερήσεων βγαίνουν ανά 25ms και μετά τα 500ms βγαίνουν ανά 500ms. Η χρήση ηλεκτρικών συστημάτων έναυσης, σε σήραγγες που χρησιμοποιείται ηλεκτρικός και υδραυλικός εξοπλισμός, ενέχει τον κίνδυνο τυχαίας ανάφλεξης των υπονόμων από υπάρχοντα εξωτερικά ηλεκτρικά πεδία, όπως παρασιτικά ρεύματα, ηλεκτροστατικές εκκενώσεις, ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, και κεραυνοί.

Στα ηλεκτρονικά καψύλλια η έναυση πραγματοποιείται με τη διέλευση ρεύματος δευτερεύοντος κυκλώματος που προέρχεται εξ επαγωγής. Το ρεύμα στο πρωτεύον κύκλωμα είναι εκτός των κανονικών συχνοτήτων των ρευμάτων στο έργο, παρασιτικών ή μη. Ως εκ τούτου δεν υπάρχει κίνδυνος τυχαίας ανάφλεξης από αυτά. Στα καψύλλια αυτά τα στοιχεία επιβράδυνσης είναι ηλεκτρονικά κυκλώματα. Τα καψύλλια έχουν μεγάλη ακρίβεια έναυσης και προσφέρονται σε αυξημένο αριθμό δυνατοτήτων καθυστέρησης.

Τα μη ηλεκτρικά συστήματα χρησιμοποιούν για τη μετάδοση του σήματος έναυσης χαμηλής ισχύος εκρηκτική θρυαλλίδα, γνωστών με τις εμπορικές ονομασίες NONEL, EXEL, κλπ. Το σύστημα NONEL βασίζεται σε πλαστικό σωλήνα εσωτερικής διαμέτρου 1.2mm, η εσωτερική επιφάνεια του οποίου έχει επιχριστεί με λεπτότατη στρώση 0.02 g/m εκρηκτικού μίγματος HMX με αργίλιο. Με την πυροδότηση μεταφέρεται εσωτερικά με αξιοπιστία ασθενές κρουστικό κύμα με ταχύτητα περίπου 2100m/s. Το εκρηκτικό κύμα σηματοδοτεί την έναυση εκρηκτικής ύλης καψυλλίου επιβράδυνσης. Υπάρχουν 60 αριθμοί (NONEL, 2003) καθυστέρησης (σειρά LP), από 25ms έως 6000ms, με αύξηση ανά αριθμό αρχικά τα 100ms που αυξάνεται όσο μεγαλώνει η αρίθμηση. Το σύστημα αυτό δεν επηρεάζεται από τα ηλεκτρικά πεδία, και έχει σημαντική ακρίβεια στην ακολουθία των χρόνων καθυστέρησης.



Σχήμα 4-13. Διάταξη καψυλλίων επιβράδυνσης στο μέτωπο (NONEL, 2003)

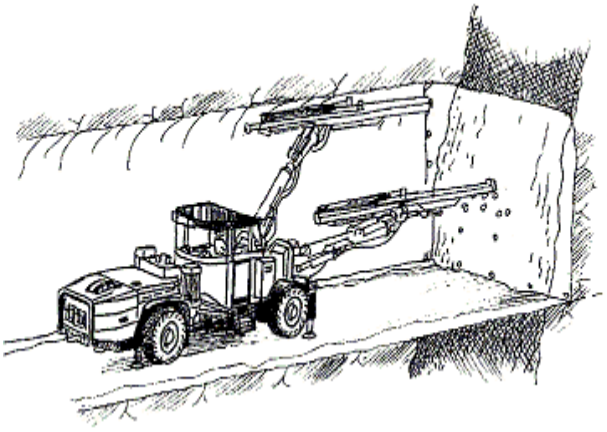
4.2.3.2 Δονήσεις

Δονήσεις κατά τη διάνοιξη σηράγγων λόγω των ανατινάξεων κάτω από πυκνοκατοικημένες περιοχές είναι δυνατό να προκαλέσουν βλάβες σε κτίσματα ή παράπονα στους κατοίκους. Οι μέγιστη σεισμική ενέργεια προέρχεται από την έκρηξη στην προεκσκαφή, όπου είναι συγκεντρωμένη η περισσότερη ενέργεια. Μείωσή της επιτυγχάνεται με την αύξηση του όγκου των κενών διατρημάτων. Μείωση επίσης επιτυγχάνεται με τη μείωση της εκλυόμενης ενέργειας έκρηξης ανά χρόνο καθυστέρησης. Προς τούτο, θα πρέπει τα διατρήματα να είναι μικρού σχετικά μήκους και να χρησιμοποιούνται καψύλλια χρόνου (ms) ώστε ανά πάσα στιγμή η ποσότητα της ταυτόχρονα εκρηγνυομένης εκρηκτικής ύλης να είναι μικρότερη εκείνης που μπορεί να προκαλέσει δονήσεις με μέγιστη ταχύτητα μεγαλύτερη από εκείνη που ορίζεται στις ισχύουσες διατάξεις (Crandall, 1960; Leet, 1960).

4.2.4 Παραδείγματα ανατίναξης

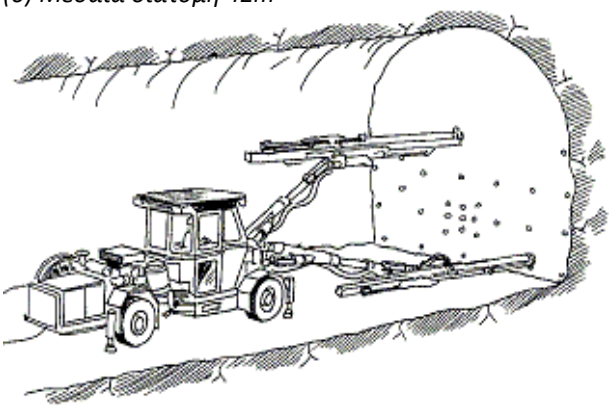
Στο Σχήμα 4-14 δίνονται παραδείγματα ανατίναξης σε μικρής (4-20m^2) και μεσαίας (20-60m^2) διατομής σήραγγες.

(α) Μικρή διατομή 16.2m^2



Αριθμός διατρημάτων 45+1 για λεία τοιχώματα, άλλως γενικά 37+1
Κατάλληλα εκρηκτικά: Δυναμίτες, γαλακτώματα ή slurry σε φυσίγγια
Για αποδοτική γόμωση, ANFO ή αντλήσιμο γαλάκτωμα.
Σύστημα έναυσης: NONEL

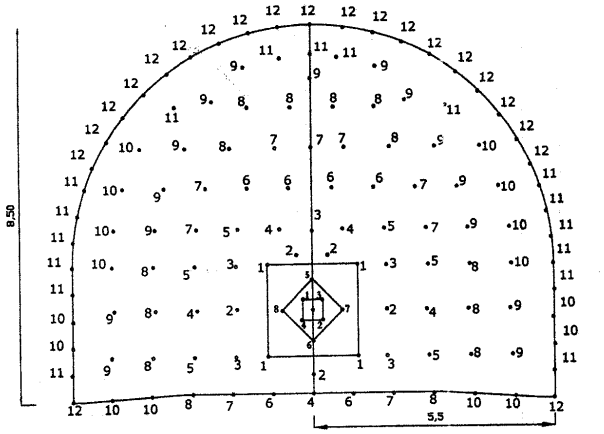
(β) Μεσαία διατομή 42m^2



Παράλληλη προεκσκαφή, 45mm διάτρημα, βάθος 5.2m
3 κενά διατρήματα 89mm
90 διατρήματα
ANFO, αντλούμενο γαλάκτωμα (SSE)
Περιμετρικά 17mm γομώσεις ή 40-80g/m εκρηκτική θρυαλλίδα. Σύστημα έναυσης: NONEL

Σχήμα 4-14. Διάτρηση μετώπου σηράγγων μικρής και μεσαίας διατομής (Anonymous)

Στο Σχήμα 4-15 δίνεται παράδειγμα από την κατασκευή μεγάλης διατομής (>60m^2) σήραγγας των ελληνικών αυτοκινητοδρόμων.



Τεχνικά στοιχεία
Κατηγορία βραχομάζας II, RMR=60-70
Εμβαδόν : *81.52 m²*
Ύψος : *8.5m*
Πλάτος βάσης: *2x5.5 m*
Ύψος κέντρου θόλου: *3.0m*
Βήμα προχώρησης: *3.5 m*

Στοιχεία ανατίναξης
Ζελατινοδυναμίτης 30 %
Προεκσκαφή: 16 διατρήματα με γόμωση 0÷3.15 kg/διάτρημα
Δάπεδο: B=0.86 m, S=0.95 m, q= 6.3 kg/διάτρημα.
Κυρίως εκσκαφή: B=0.95 m, S=0.95÷1.03 m, q=2.82 kg/διάτρημα
Πλευρές: B=0.77 m, S=0.60 m, q=1.68 kg/διάτρημα.
Οροφή: B=0.77 m, S=0.60m, q=1.26 kg/διάτρημα

Στοιχεία διάτρησης
Τύπος προεκσκαφής: παράλληλη
Διάμετρος διατρήματος : *45mm*
Διάμετρος προεκσκαφής : *102mm*
Αριθμός διατρημάτων : *134*
Μήκος διατρήματος : *4.2m*
Εκτίμηση προχώρησης: *84%, 3.5m/βήμα*
Όγκος ανατίναξης: *285m³/βήμα*

Σχήμα 4-15 Παράδειγμα διάταξης και γόμωσης διατρημάτων σήραγγας Κλάδου 28 της Δυτικής Περιφερειακής Λεωφόρου Υμηττού, λαμβάνοντας υπόψη τα επιτρεπόμενα επίπεδα δονήσεων από τις ανατινάξεις (Καραλής, 2007).

4.2.5 Μετά την ανατίναξη

Μετά την ανατίναξη, εντείνεται η λειτουργία του συστήματος εξαερισμού της σήραγγας προκειμένου να απομακρυνθούν τα αέρια της έκρηξης, τα οποία είναι τοξικά. Ο αγωγός εξαερισμού πρέπει να φτάνει κοντά στο μέτωπο, να μην έχει κάμψεις, να έχει επαρκείς στηρίξεις, να είναι αεροστεγής, και να εξέρχεται σε κάποια απόσταση από το στόμιο της σήραγγας (Σχήμα 4-16α) ώστε να αποφεύγεται η επανακυκλοφορία (TBG & STUVA, 1989). Παραδοσιακά ο εξαερισμός επιτυγχάνεται από τον αγωγό αερισμού φυσητικά με ώθηση του τοξικού αέρα από το μέτωπο μέσω της σήραγγας προς την έξοδο. Αντίθετα, με αναρροφητικό σύστημα ο τοξικός αέρας του μετώπου απομακρύνεται προς την έξοδο, μέσα από τον αγωγό αερισμού. Η πρώτη περίπτωση επιτρέπει τη γρήγορη διασπορά των τοξικών αερίων της έκρηξης. Η δεύτερη αποφεύγει το πέρασμα του τοξικού αέρα από τους εργαζόμενους. Η απομάκρυνση των τοξικών αερίων απαιτεί τουλάχιστον 10 min, και στο διάστημα αυτό δεν επιτρέπεται η είσοδος σε κανέναν.

Στη συνέχεια πραγματοποιείται ο έλεγχος του αποτελέσματος της ανατίναξης, και ο εντοπισμός τυχόν χαλαρών επισφαλών πετρωμάτων στην οροφή και τις παρειές της σήραγγας. Η απομάκρυνσή τους, το ξεσκάρωμα, επιτυγχάνεται είτε με τη βοήθεια μηχανικού ξεσκαρωτή (Σχήμα 4-16β) είτε χειρονακτικά με τη βοήθεια λοστών. Στη δεύτερη περίπτωση ο ξεσκαρωτής θα εκτελεί την εργασία του από το καλάθι του διατρητικού φορείου βρισκόμενος κάτω από υποστηριγμένη περιοχή (Σχήμα 4-16γ).

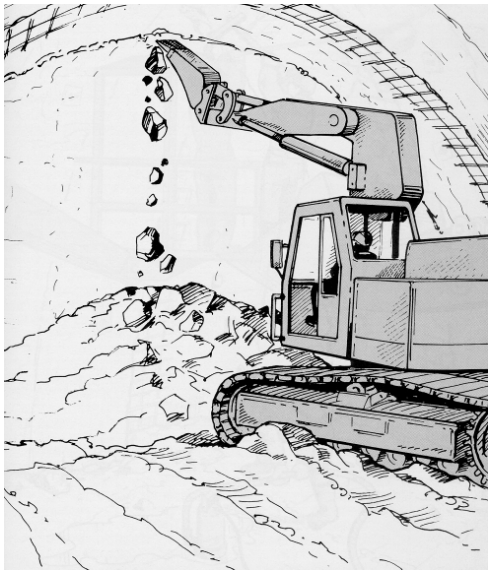
Ακολουθεί η διαδικασία αποκόμισης των μπαζών. Αυτή πραγματοποιείται με ποικιλία μεθόδων, όπως με φορτηγά (Σχήμα 4-16δ), ή με μεταφορικούς ιμάντες. Ο εξοπλισμός πρέπει να είναι επαρκής ώστε να ο χρόνος αδράνειας των εργασιών στο μέτωπο να είναι ο ελάχιστος δυνατός. Στην επιλογή του εξοπλισμού λαμβάνονται ιδιαίτερα υπόψη οι φθοροποιές ιδιότητες του πετρώματος. Κατά την φόρτωση των φορτηγών η περιοχή θα πρέπει να φωτίζεται καλά, να εκπέμπονται κατάλληλα φωτεινά και ηχητικά σήματα από τους φορτωτές και τα φορτηγά, και να μην εισέρχονται άλλοι εργαζόμενοι στην περιοχή. Κατά την κυκλοφορία, τα φορτηγά θα πρέπει να κινούνται με χαμηλή ταχύτητα και να μην είναι υπερφορτωμένα.

Η άμεση στήριξη αποτελεί το τελευταίο στάδιο του κύκλου της μεθόδου. Μολονότι υπάρχουν περιπτώσεις που δεν απαιτείται η τοποθέτησή της, όπως αποδεικνύεται από πολλά έργα του παρελθόντος που στέκουν ακόμη στη θέση τους, στα σύγχρονα έργα τοποθετείται σχεδόν πάντα. Αποβλέπει στην προστασία των εργαζομένων από καταπτώσεις, στη διατήρηση του διαταραγμένου πετρώματος στη θέση του, καθώς και στην αντίσταση έναντι γεωστατικών πιέσεων. Ξύλινα πλαίσια αποτελούν την απλούστερη μορφή άμεσης

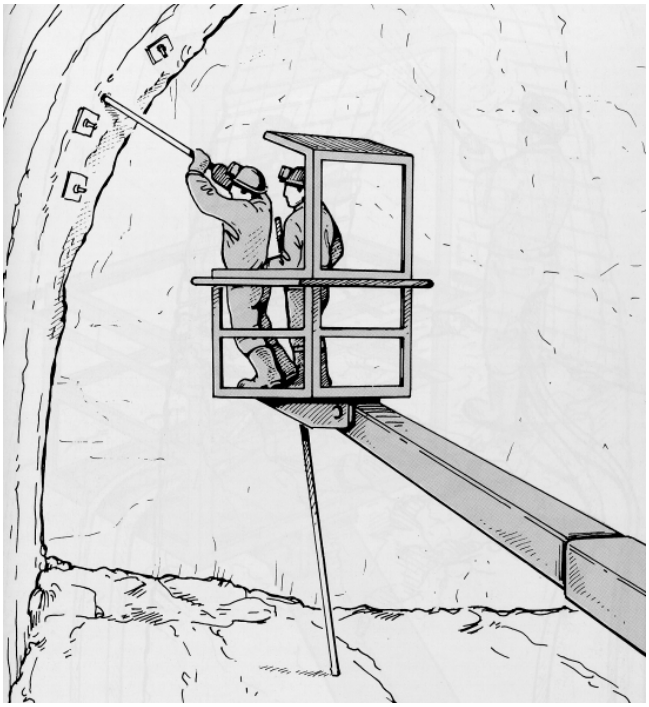
υποστήριξης, που εφαρμόζεται πλέον μόνο σε οδηγούς ή κάποιες μεταλλευτικές στοές . Στη συνέχεια αρχικά αντικαταστάθηκαν από τα χαλύβδινα πλαίσια. Σύγχρονα μέσα άμεσης στήριξης, ειδικά σε μεγάλες σήραγγες, αποτελούν πλέον οι ηλώσεις (Σχήμα 4-16, κάτω δεξιά) και το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, ενώ τη θέση τους εξακολουθούν να έχουν και τα χαλύβδινα πλαίσια, σε συνδυασμό με τα άλλα μέτρα, όταν απαιτούνται βαρύτερες διατομές υποστήριξης. Η τοποθέτηση των μέτρων είναι από τις πιο επικίνδυνες εργασίες καθόσον πραγματοποιείται σε θέσεις ανυποστήρικτη διατομής. Η TBG & STUVA (1989) δίνει σαφείς οδηγίες για την ασφάλεια των εργασιών στις σήραγγες.



(α) Σύστημα αερισμού σήραγγας Καλυδώνας



(β) Ξεσκάρωμα οροφής σήραγγας (TBG & STUVA, 1989)



(γ) Άμεση στήριξη σήραγγας (TBG & STUVA, 1989



(δ) Ξεμπάζωμα σήραγγας (TBG & STUVA, 1989)

Σχήμα 4-16. Εργασίες μετά τη ανατίναξη.

Γενικά, μετά το τέλος της διάνοιξης της σήραγγας, τοποθετείται, η τελική επένδυση. Τούτο επιτρέπει, η κατασκευή της να μην αποτελεί μέρος του κύκλου εργασιών της διάνοιξης, η οποία κατ' αυτόν τον τρόπο επιταχύνεται. Παρ' όλα αυτά, εφόσον απαιτείται από τη μελέτη, είναι δυνατό να ακολουθεί η κατασκευή της μόνιμης επένδυσης σε κάποια απόσταση από το μέτωπο. Σύγχρονες διεθνείς τάσεις επιζητούν πλέον την

κατασκευή σηράγγων μονού κελύφους, ήτοι η άμεση επένδυση να έχει λειτουργία και μόνιμης τελικής επένδυσης. Τούτο ήδη εφαρμόζεται σε ορισμένες περιπτώσεις σε άλλες χώρες, όπως η Νορβηγία.

4.3 Εμπειρικές οδηγίες διάνοιξης

Οι οδηγίες αυτές συσχετίζουν την πρακτική εμπειρία που αποκτήθηκε από προηγούμενα έργα με τις αναμενόμενες συνθήκες προτεινόμενου έργου. Η συσχέτισή αυτή επιτυγχάνεται με την ταξινόμηση των γεωτεχνικών συνθηκών των σηράγγων με διάφορα συστήματα, οι οδηγίες των οποίων εφαρμόζονται ευρέως στην επιλογή της κατάλληλης τεχνικής για τη διάνοιξη. Στην πληρέστερη μορφή τους οι οδηγίες περιλαμβάνουν προτάσεις φάσεων διάνοιξης, μηκών προχώρησης, ποσοτικών στοιχείων υποστήριξης, φόρτισης της υποστήριξης, και μηχανικών ιδιοτήτων της βραχομάζας. Τα πιο γνωστά από αυτά είναι του Terzaghi (1946) με την τροποποίησή του από τους Deere et al. (1970), του Lauffer (1958), των Wickham et al. (1972), του Bieniawski (1973, 1989), και των Barton et al. (1974), παραλλαγή του οποίου είναι του Palmström (1996). Παρακάτω αναπτύσσονται τρία από αυτά.

Πίνακας 4-5. Βαθμονόμηση, φορτίο και παρατηρήσεις για την αντιστήριξη, σύμφωνα με τους Deere et al. (1970)

RQD %	**Κατάσταση βράχου**	**Φορτίο Βράχου h_p** **Αρχικό**	**Τελικό**	**Παρατηρήσεις**
	1. Σκληρός και συμπαγής (Hard and intact)	0	0	Επένδυση μόνο για εκρηκτικές απολεπίσεις.
98	2. Σκληρός διαστρωμένος ή σχιστώδης (Hard stratified or schistose)	0	0.25B	Συνήθεις οι αποφλοιώσεις
90	3. Μαζώδης, μέτρια κερματισμένος (Massive, moderately jointed)	0	0.50B	Πλευρικές πιέσεις μόνον αν κεκλιμένα στρώματα. Λίγες αποφλοιώσεις
75	4. Μέτρια κερματισμένος και με ενστρώσεις (Moderately blocky and seamy)	0	0.25B – 0.35C	
50	5. Πολύ κερματισμένος με ενστρώσεις, και διαρρηγμένος (Very blocky seamy and shattered)	0 - 0.60C	0.35C – 1.10C	Λίγη ή καθόλου πλευρική πίεση
25	6. Πλήρως θρυμματισμένος (Completely crushed)		1.10C	Σημαντική πλευρική πίεση Για διήθηση αντιστήριξη
2	7. Χαλίκια και άμμος: (Gravel and sand)			Πλευρική πίεση $p_h=0.3\gamma(0.5H_t+h_p)$
	Πυκνά	0.54C - 1.20C	0.62C -1.38C	
	Χαλαρά	0.94C – 1.20C	1.08C – 1.38C	
Ασθενές και συνεκτικό	8. Συνθλίβον σε μέτριο βάθος (Squeezing, moderate depth)		1.10C – 2.10C	Μεγάλη πλευρική πίεση Απαιτείται συνεχής αντιστήριξη
	9. Συνθλίβονσε μεγάλο βάθος (Squeezing, great depth)		2.10C-4.50C	
	10. Διογκούμενο (Swelling)		Έως 75m	Αντιστήριξη δακτυλίου. Σε ακραίες καταστάσεις υποχωρούσα αντιστήριξη
Σημείωση:	α. Στις κατηγορίες 4, 5, 6 και 7 δυνάμεθα να μειώσουμε το φορτίο h_p στο 50% της τιμής του, εφόσον η στάθμη της σήραγγας είναι πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα. β. Το φορτίο που δρα στην αντιστήριξη είναι κατάλληλο για αντιστήριξη με χαλύβδινα πλαίσια γ. Β το πλάτος της σήραγγας, Ht το ύψος της σήραγγας, C = B + H_t			

4.3.1 Οδηγίες με βάση το RQD

Πρώτος ο Terzaghi (1946), με βάση την ποιότητα της βραχομάζας, έδωσε οδηγίες εκτίμησης των φορτίων που δρουν επί των χαλύβδινων πλαισίων που τοποθετούνται κατά τη διάνοιξη σήραγγας. Οι Deere et al. (1970), στη συνέχεια συνέδεσαν την ποιότητα αυτή με την τιμή του RQD. Κατ' αυτόν τον τρόπο η ποιότητα του πετρώματος συνδέθηκε με τη φόρτιση της άμεσης και της τελικής στήριξης, σήραγγας υποστηριζόμενης με χαλύβδινα πλαίσια σε οποιοδήποτε τύπο βραχομάζας. Ο Πίνακας 4-5, για τις 10 κατηγορίες βραχομάζας που θεωρήθηκαν, δίνει τη φόρτισή των πλαισίων κατά τη διάνοιξη και κατά τη λειτουργία σήραγγας, καθώς και παρατηρήσεις για τη συμπεριφορά της.

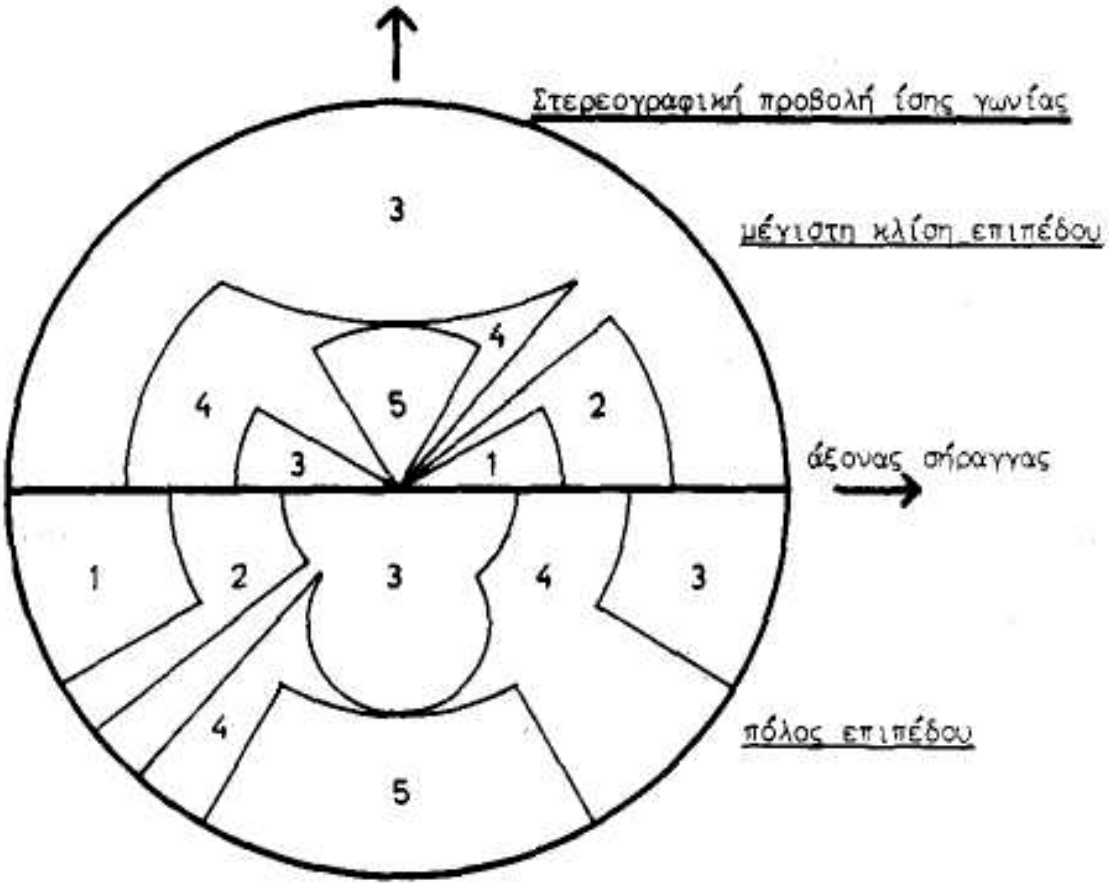
4.3.2 Οδηγίες από τη γεωμηχανική ταξινόμηση (RMR)

Τα συστήματα ταξινόμησης στη συνέχεια εξελίχθηκαν (King, 1996), ώστε να συμπεριλάβουν τόσον λεπτομερέστερα τα χαρακτηριστικά που αφορούν τη γεωμάζα, όσον και τους νεώτερους τύπους στήριξης. Το σύστημα RMR (Bieniawski, 1989) δίνει οδηγίες συμβατικής διάνοιξης σηράγγων πεταλοειδούς διατομής, πλάτους B=10m, σε εντατικό πεδίο μέχρι p=25MPa (δηλ. <1000m), με τη μέθοδο διάτρηση-ανατίναξη, και είναι από τα πιο αναγνωρισμένα διεθνώς. Ο Πίνακας 4-6 δίνει τις οδηγίες του συστήματος για τις φάσεις εξόρυξης και τα μέτρα στήριξης, που είναι ηλώσεις, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα οπλισμένο με πλέγμα και χαλύβδινα πρότυπα πλαίσια, για πέντε διακριτές κατηγορίες βραχομάζας, οι οποίες ταξινομούνται σύμφωνα με το δείκτη RMR. Στην τελευταία στήλη του πίνακα δίνονται οι παράμετροι αντοχής του πετρώματος.

Ο δείκτης RMR, που θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει τα χαρακτηριστικά της βραχομάζας μέσα από την οποία πρόκειται να πραγματοποιηθεί η διάνοιξη, είναι το άθροισμα έξι υποδεικτών, εκ των οποίων οι τέσσερις (αντοχή άρρηκτου πετρώματος σ_{ci}, RQD, απόσταση ασυνεχειών, κατάσταση ασυνεχειών) αφορούν τη βραχομάζα και μπορούν είτε να μετρηθούν είτε να εκτιμηθούν οπτικά από πυρήνες γεωτρήσεων. Ο πέμπτος υποδείκτης αφορά τις υδραυλικές συνθήκες. Ο έκτος υποδείκτης, που είναι αρνητικός, αφορά τον προσανατολισμό του δυσμενούς συστήματος ασυνεχειών, όπως η στρώση, σε σχέση με τη διάνοιξη, που στο σύστημα αυτό λαμβάνεται σοβαρά υπόψη. Στο Σχήμα 4-17 δίνονται οι πέντε περιοχές διεύθυνσης των ασυνεχειών, σε σχέση με τη διάνοιξη, και οι αντίστοιχες απόλυτες τιμές του υποδείκτη σε κάθε περιοχή. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το σύστημα είναι αναξιόπιστο για βραχομάζες πολύ πτωχής ποιότητας, και επομένως, σε βραχομάζες κατηγορίας V δεν συνιστάται να λαμβάνονται άμεσα υπόψη οι οδηγίες διάνοιξης.

Πίνακας 4-6. Οδηγός επιλογής μόνιμης αντιστήριξης σήραγγας (Bieniawski, 1989) πεταλοειδούς διατομής. B=10m, p<25MPa, μέθοδος διάνοιξης συμβατική (διάτρηση - ανατίναξη) (Σοφιανός & Μαρίνος, 1990 – μετά από συμπλήρωση).

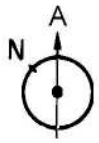
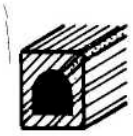
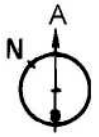
Κατηγορία της βραχομάζας **RMR**	**Εκσκαφή / Προχώρηση**	**Αντιστήριξη** **Ήλοι με διάμετρο 20mm, ολόσωμης πάκτωσης για RMR≤80 l_b[m]= 6-0.05RMR≥3 s_b[m]= 0.5+0.025RMR≥1**	**Εκτοξευμένο σκυρόδεμα** **για RMR≤80 t[mm]= 200-2.5RMR ≥50**	**Χαλύβδινα τόξα για RMR≤40 s_r[m]= 0.375· (1+RMR)**	**Αντοχή** **c* [MPa]= 0.05·RMR φ [°]=** 5+0.5RMR ** $\frac{q_{c,mass}}{\sigma_{ci}} = e^{\frac{RMR-100}{24}}$
I 81-100	Ολομέτωπη / 3m	Τοπικά μόνο	Γενικά δεν απαιτείται		>4 >45° 0.43÷1.00
II 61-80	Ολομέτωπη 1.0-1.5m.Πλήρης αντιστήριξη 20m από μέτωπο	Τοπικά στην οροφή με μήκος l_b=3m σε απόσταση s_b=2.5m και περιστασιακά χαλύβδινο πλέγμα	t=50mm στην οροφή	όχι	3÷4 35° ÷45° 0.19÷0.43
III 41-60	Ημιδιατομή και βαθμίδα /1.5-3m στην ημιδιατομή. Αντιστήριξη αρχίζει μετά την ανατίναξη, ολοκληρώνεται 10m από το μέτωπο.	Συστηματικοί ήλοι l_b=4m μήκος σε κάναβο s_b=1.5-2.0 m στην οροφή και τα τοιχώματα και χαλύβδινο πλέγμα στην οροφή	t=50-100mm στην οροφή και 30mmστα τοιχώματα	όχι	2÷3 25° ÷35° 0.082 ÷ 0.19
IV 21-40	Ημιδιατομή και μετά βαθμίδα / 1-1.5m στην ημιδιατομή. Τοποθέτηση στήριξης συγχρόνως με την εκσκαφή και ολοκλήρωση σε 10m από το μέτωπο.	Συστηματικοί ήλοι μήκους l_b=4-5m σε κάναβο s_b=1-1.5m στην οροφή και τα τοιχώματα και χαλύβδινο πλέγμα.	t=100-150mm στην οροφή και 100mm στα τοιχώματα.	Όπου απαιτείται ελαφρά σε αποστάσεις s_r=1.5m.	1÷2 15° ÷25° 0.036 ÷ 0.082
V 0-20	Πολλαπλές διανοίξεις /0.5-1.5m στο άνω τμήμα. Τοποθέτηση της αντιστήριξης συγχρόνως με την εκσκαφή. Εκτοξεύομενο σκυρόδεμα όσο το δυνατό γρηγορότερα μετά την ανατίναξη.	Συστηματική ήλωση μήκους l_b=5-6m σε κάναβο s_b=1-1.5m στην οροφή και τα τοιχώματα και χαλύβδινο πλέγμα. Ήλωση του ανάστροφου τόξου.	t=150-200mm στην οροφή, 150mm στα τοιχώματα και 50mm στο μέτωπο.	Μεσαία ως βαριά σε αποστάσεις s_r=0.75m. Τοποθέτηση δοκών προπορείας και πλακών προστασίας από καταπτώσεις όπου απαιτείται. Κλειστό δάπεδο.	<1 <15° <0.036
Σημείωση:	* Οι τιμές της συνοχής για σήραγγες, που δίνονται στον πίνακα, είναι μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερες από αυτές που δίνονται στον πίνακα του συστήματος, επειδή (Singh & Goel, 1999, §6.4.2) οι διακλάσεις είναι συγκριτικά σφιχτές και πιο αραιές. ** (Kalamaras & Bieniawski, 1995)				



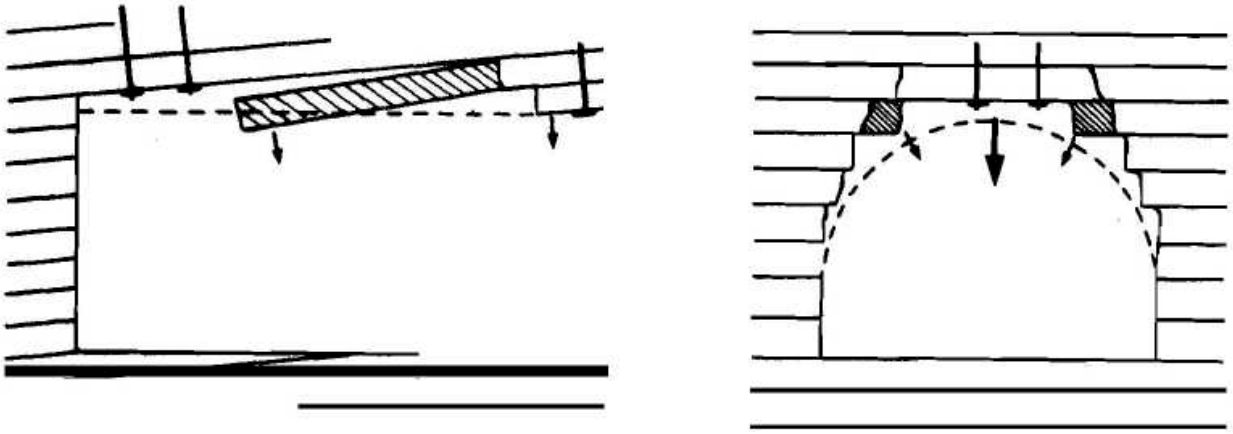
Αριθμός διαγράμματος	1	2	3	4	5
Μείωση βαθμών	0	2	5	10	12

Σχήμα 4-17. Μείωση του RMR με τη διεύθυνση της ασυνέχειας (Σοφιανός & Μαρίνος, 1990)

Παραδείγματα διευθύνσεων ασυνεχειών, που αντιστοιχούν στις περιοχές αυτές, φαίνονται στο Σχήμα 4-18. Στα επόμενα τρία σχήματα φαίνονται οι δυσκολίες που αντιμετωπίζονται κατά τη διάνοιξη για τρεις χαρακτηριστικές σχετικές διευθύνσεις ασυνεχειών. Στο Σχήμα 4-19 παρατηρούμε βύθιση της παραοριζόντιας στρώσης (Κατηγορία 3) που ενέχει τον κίνδυνο αποκόλλησης πλακών της οροφής και απαιτεί πρόσθετη ήλωση.

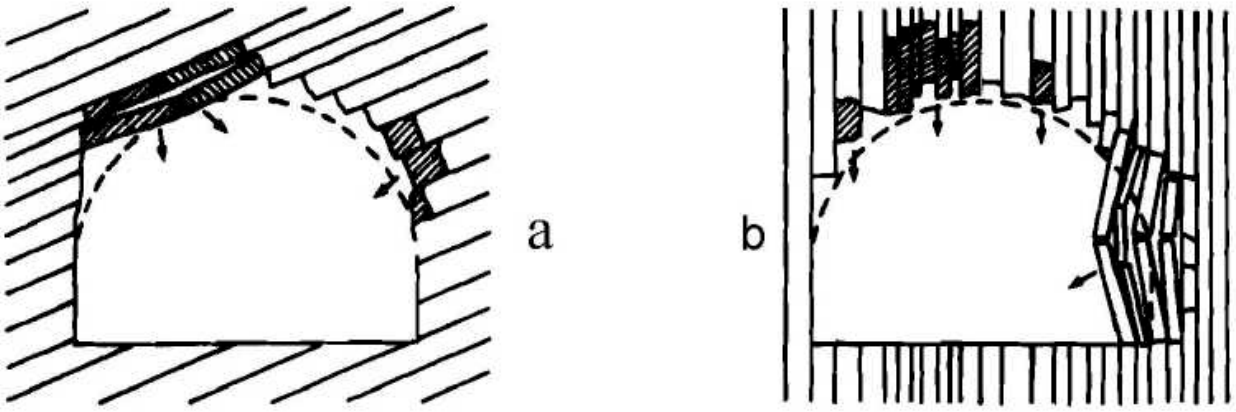
	Κατηγορία (3): Οικογένεια παραοριζόντιων ασυνεχειών	
	Κατηγορία (5): Οικογένεια ασυνεχειών με παράταξη παράλληλη με τον άξονα, και ισχυρή κλίση στα αριστερά	
	Κατηγορία (4, 3): Οικογένεια ασυνεχειών με παράταξη κάθετη προς τον άξονα της σήραγγας και κατεύθυνση αντίθετη με την κλίση	
	Κατηγορία (1, 2): Οικογένεια ασυνεχειών με παράταξη κάθετη προς τον άξονα της σήραγγας και κατεύθυνση ομόρροπη με την κλίση	

Σχήμα 4-18. Απεικόνιση διάφορων διευθύνσεων διαστρωμάτωσης. Σημ. Οι στερεογραφικές προβολές είναι άνω ημισφαιρίου.



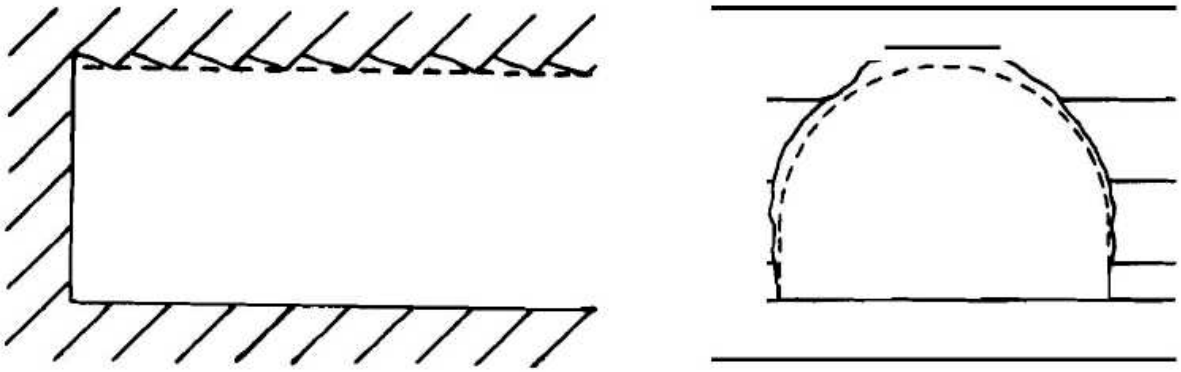
Σχήμα 4-19. Υποπαράλληλες με τον άξονα της σήραγγας στρώσεις (Bouvard, et al., 1992)

Στο Σχήμα 4-20 η παράταξη της στρώσης είναι παράλληλη με τον άξονα της σήραγγας, και η κλίση της είναι 20÷45° (Κατηγορία 3) ή κατακόρυφη (Κατηγορία 5). Παρατηρούμε το λυγισμό των στρωμάτων που είναι παράλληλα προς το τοίχωμα και απαιτούν ήλωση, και τον κίνδυνο πτώσης πλακών στην περίπτωση κατακόρυφων στρωμάτων. Επίσης, η προχώρηση κατά κανόνα είναι πτωχή και δημιουργούνται πολύ ανώμαλες επιφάνειες μετά την ανατίναξη (Τσουτρέλης, 2001). Προβλήματα παρουσιάζονται επίσης εάν τα κατακόρυφα στρώματα είναι υπό γωνία ως προς τον άξονα της σήραγγας (κατηγορία 4), οπότε το πέτρωμα θραύεται διαφορετικά στη μία πλευρά από ότι στην άλλη.



Σχήμα 4-20. Παράταξη στρωμάτων παράλληλη με τον άξονα της σήραγγας (Bouvard, et al., 1992)

Στο Σχήμα 4-21 η διεύθυνση της κλίσης των στρωμάτων είναι παράλληλη και ομόρροπη με τον άξονα διάνοιξης της σήραγγας, και η κλίση είναι ~45°. Η διεύθυνση αυτή (Κατηγορία 1,2) δεν ενέχει ιδιαίτερους κινδύνους και χαρακτηρίζεται ως ευνοϊκή.



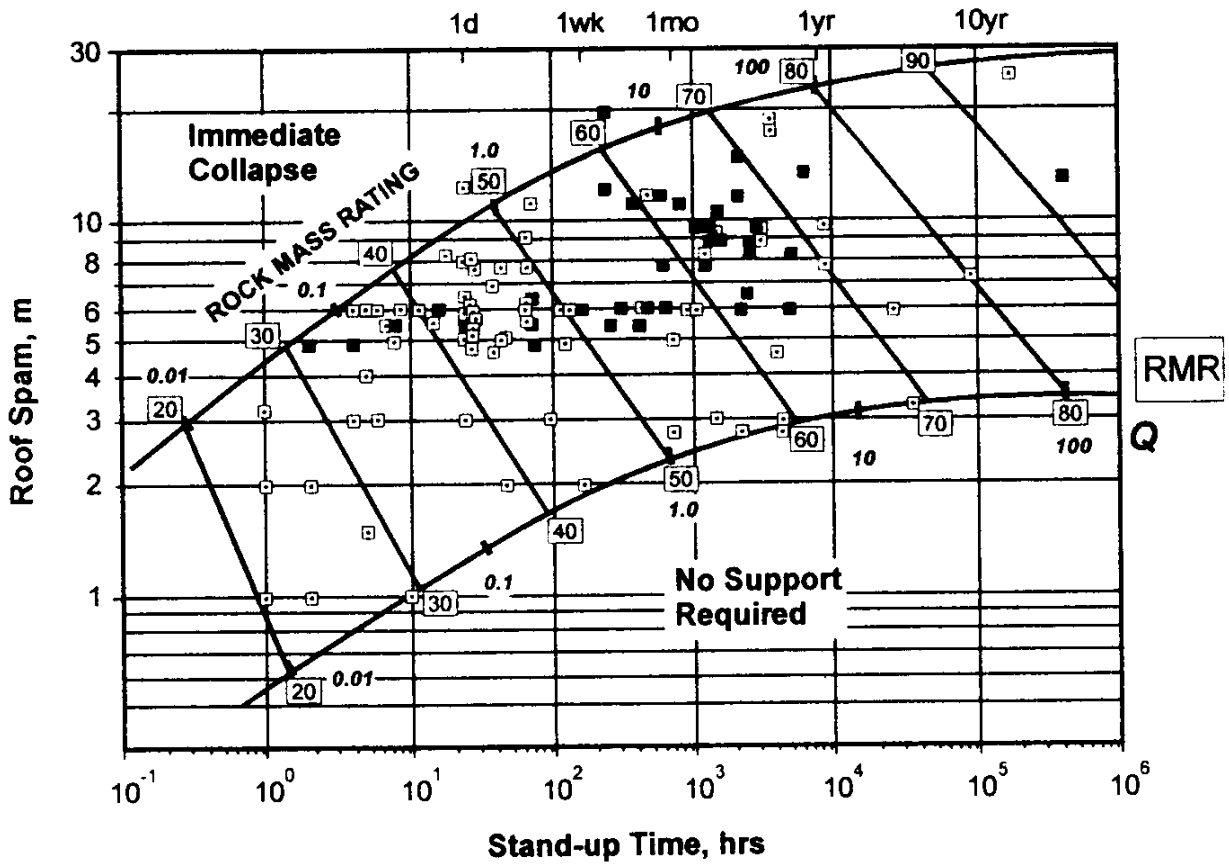
Σχήμα 4-21. Διεύθυνση κλίσης στρωμάτων ομόρροπη με τον άξονα της σήραγγας (Bouvard, et al., 1992)

Το ύψος h_t των υπερκειμένων που φορτίζουν τη στήριξη του υπόγειου ανοίγματος πλάτους B, υπολογίζεται συναρτήσει του δείκτη RMR (Bieniawski, 1989) από τη σχέση:

$$h_t = \frac{100 - RMR}{100} \cdot B$$

(4-3)

Με βάση το δείκτη RMR δύναται επίσης να εκτιμηθεί ο χρόνος ευστάθειας (αυτοϋποστήριξης) του υπόγειου ανοίγματος, και ως εκ τούτου να επιλεγεί πότε θα πρέπει να τοποθετηθεί η στήριξη. Στο Σχήμα 15 δίνονται οι χρόνοι ευστάθειας του μετώπου σήραγγας ως συνάρτησης του ανυποστήρικτου μήκους και της ποιότητας της βραχομάζας. Ως ανυποστήρικτο μήκος ορίζεται το μικρότερο (Singh & Goel, 1999) από τα: ανυποστήρικτη απόσταση από το μέτωπο, πλάτος ανοίγματος.



Σχήμα 4-22. Χρόνος ευστάθειας μετώπου σήραγγας (Bieniawski, 1989) συναρτήσει του ανοίγματος και της ποιότητας της βραχομάζας (Barton, 2000).

4.3.3 Νορβηγική Μέθοδος Σηραγγοποιίας (NMT)[16]

Στα σκληρά, ρωγματωμένα πετρώματα η μέθοδος διάτρηση-ανατίναξη οδηγεί συχνά σε υπερεκσκαφές, εξαιτίας των οποίων, η χρήση εκτοξευμένου σκυροδέματος οπλισμένου με μεταλλικό πλέγμα καθίσταται δυσχερής. Ομοίως καθίσταται και η χρήση χαλύβδινων τόξων (δικτυωτών ή ολόσωμων). Παρουσία υπερεκσκαφών, τέτοια μέτρα υποστήριξης απαιτούν περισσότερο χρόνο για την εφαρμογή, συχνά οδηγούν σε μεγάλη κατανάλωση σκυροδέματος, ενώ ενδεχομένως προκαλούν και ανασφαλείς, για την κατασκευή, συνθήκες. Οι παραπάνω λόγοι οδηγούν κατά περίπτωση στην αντικατάσταση του συνδυασμού «εκτοξευμένο σκυρόδεμα με μεταλλικό πλέγμα S(mr) - χαλύβδινα πλαίσια», από «ινοπλισμένο εκτοξευμένο σκυρόδεμα S(fr) χωρίς χαλύβδινα πλαίσια». Η χρήση του S(fr) εξαπλώθηκε γρήγορα σε χώρες όπως η Νορβηγία, όπου συχνά αντιμετωπίζονται σκληρά και ρωγματωμένα πετρώματα. Αναπτύχθηκε έτσι μία λογική κατασκευής όπου η προσωρινή υποστήριξη αποτελείται σχεδόν αποκλειστικά από S(fr) και B (ήλους), ενώ ουσιαστικά καταργείται η χρήση χαλύβδινων πλαισίων. Η λογική αυτή, συμπληρωμένη με πρόσθετα χαρακτηριστικά και με γενικές οδηγίες για τη σύναψη συμβάσεων κατασκευής σηράγγων, εξελίχθηκε σε μέθοδο διάνοιξης με την ονομασία NMT.

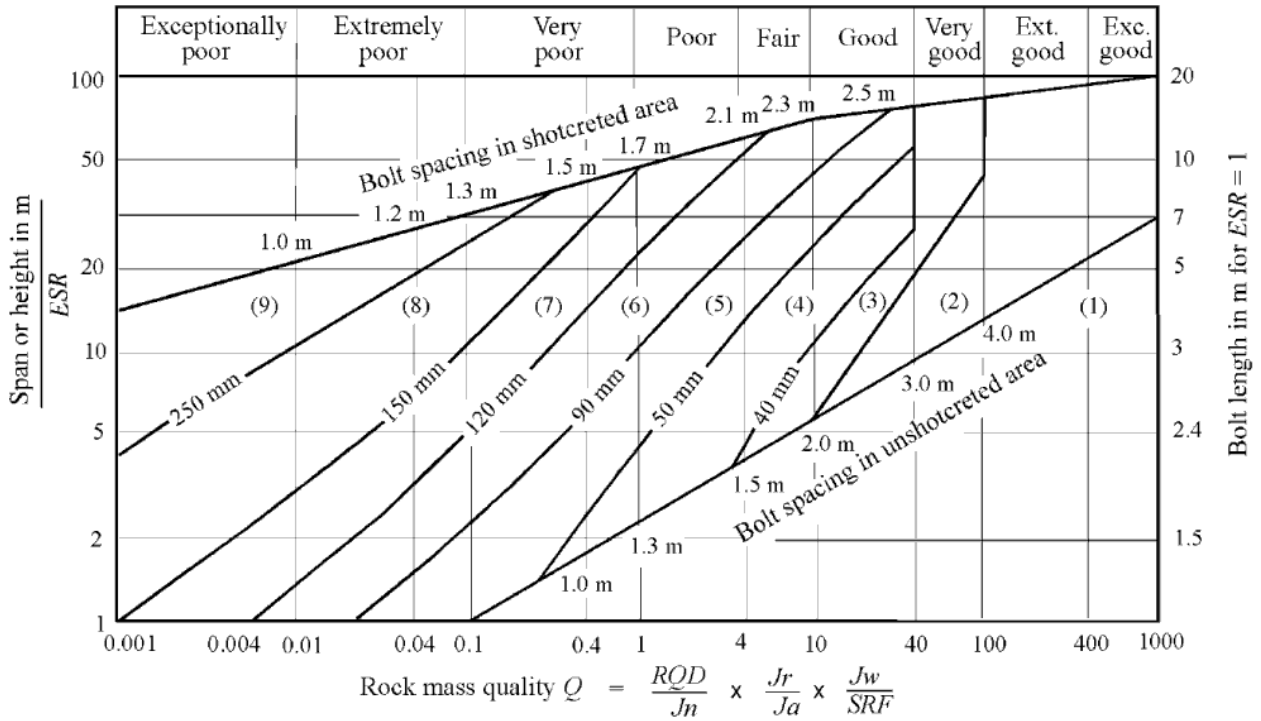
[16] *Η μέθοδος εκσκαφής που συνηθέστερα εφαρμόζει είναι η των ανατινάξεων, χωρίς να αποκλείονται άλλες. Επίσης, η μέθοδος δεν δίνει τις φάσεις διάνοιξης και ποσοτικά στοιχεία για την άμεση στήριξη*

Πίνακας 4-7. Ουσιαστικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα της NMT (Barton and Grimstad, 1994)

Συνθήκες συνήθους εφαρμογής	Ρωγματωμένα πετρώματα που προκαλούν υπερεκσκαφές, σκληρά πετρώματα στην κλίμακα της μονοαξονικής αντοχής (σ_{ci} = 3 έως 300 MPa) Αργιλικές ζώνες, αποκόλληση πλακιδίων πετρώματος λόγω υψηλών τάσεων (stress slabbing) Δείκτης Q = 0.001 έως 10 ή μεγαλύτερο
Συνήθεις μέθοδοι εκσκαφής	Μέθοδος διάτρησης-ανατίναξης, TBM για σκληρά πετρώματα, Μηχανική εκσκαφή σε ζώνες αργίλου
Προσωρινή και μόνιμη υποστήριξη	CCA, S(fr)+RRS+B, B+S(fr), B+S, S(fr), S, sb, (KAMIA) Διευκρινήσεις: * Η προσωρινή ενίσχυση αποτελεί μέρος της μόνιμης υποστήριξης * Δεν χρησιμοποιείται εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με πλέγμα * Ξηρή μίξη εκτοξευόμενου σκυροδέματος δεν εφαρμόζεται * Χαλύβδινα τόξα ολόσωμης διατομής (steel sets) ή δικτυωτά (lattice girders) δεν χρησιμοποιούνται· RRS και S(fr) χρησιμοποιούνται μόνο στις ζώνες αργίλου και σε ζώνες ασθενών και συνθλιβόμενων πετρωμάτων * Η επιλογή της προσωρινής υποστήριξης γίνεται από τον Ανάδοχο του έργου * Η επιλογή της μόνιμης υποστήριξης γίνεται από τον Ιδιοκτήτη/Σύμβουλο * Τελική επένδυση από σκυρόδεμα δεν εφαρμόζεται συχνά· η συνήθης τελική υποστήριξη αποτελείται από B+S(fr)
Χαρακτηρισμός μάζας του πετρώματος	* Πρόβλεψη της ποιότητας της μάζας του πετρώματος * Πρόβλεψη των αναγκών υποστήριξης * Αναθεώρηση των ανωτέρω κατά τη διάρκεια της διάνοιξης (ενόργανη παρακολούθηση μόνο σε ειδικές/κρίσιμες περιπτώσεις)
Η NMT δίνει χαμηλό κόστος	* Υψηλοί ρυθμοί προχώρησης σε σήραγγες διανοιγόμενες με διάτρηση-ανατίναξη * Βελτιωμένη ασφάλεια * Βελτιωμένες συνθήκες εργασίας
Υπόμνημα	CCA = έγχυτο σκυρόδεμα, S(fr) = ινοπλισμένο (με χαλύβδινες ίνες) εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, RRS = εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με νευρώσεις (=εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με ενισχυμένες ζώνες οπλισμένες με χαλύβδινες ράβδους), B = συστηματική ήλωση του πετρώματος, S = άοπλο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, sb = σποραδική ήλωση του πετρώματος, KAMIA = καμία υποστήριξη δεν απαιτείται

Ο όρος «NMT», συντομογραφία της Νορβηγικής Μεθόδου Σηραγγοποιίας (Norwegian Method of Tunnelling), εισήχθη από τους Barton et. al. (1992a). Ο Πίνακας 4-7 δίνει περιληπτικά τους τύπους βραχομάζας στους οποίους εφαρμόζεται η μέθοδος, τον τρόπο εκσκαφής, τα χρησιμοποιούμενα μέτρα στήριξης, το σκοπό του χαρακτηρισμού της βραχομάζας και τα πλεονεκτήματα της εφαρμογής της. Η NMT περιγράφεται από ένα σύνολο τεχνικών για την γεωτεχνική έρευνα, το σχεδιασμό, την εκσκαφή και την υποστήριξη του πετρώματος. Εφαρμόζει τη λογική διάνοιξης με βάση τη συνεχή παρακολούθηση (γνωστή ως 'Μέθοδος της Παρατήρησης'). Θεωρείται κατάλληλη για διάνοιξη με διάτρηση-ανατίναξη σε σκληρά ρωγματωμένα πετρώματα που τείνουν να προκαλούν υπερεκσκαφές, μολονότι έχει εφαρμοστεί και σε μαλακούς σχηματισμούς, όπως π.χ. στη σήραγγα Μποζαΐτικων στην παράκαμψη Πατρών της ΠΑΘΕ (Chryssanthakis et al., 1998).

Η προσωρινή υποστήριξη βασίζεται σε περιγραφή του πετρώματος και την εφαρμογή ινοπλισμένου εκτοξευμένου (ψεκασμένου) σκυροδέματος και συστηματικής ήλωσης. Η μόνιμη στήριξη της σήραγγας, που εφόσον απαιτείται τοποθετείται ως συμπληρωματική της προσωρινής, αποτελείται επίσης από ήλους και ινοπλισμένο εκτοξευμένο σκυρόδεμα (B+S(fr)), και σε ιδιαίτερα αντίξοες συνθήκες από επένδυση έγχυτου σκυροδέματος. Η μόνιμη στήριξη της σήραγγας επιλέγεται, με βάση την παρατήρηση του πετρώματος κατά τη διάνοιξη, από τις εννέα κατηγορίες που φαίνονται στο Σχήμα 4-23, οι οποίες σύμφωνα με το διάγραμμα εξαρτώνται από το δείκτη Q (Barton *et al.*, 1974) της ποιότητας της βραχομάζας, το πλάτος B του ανοίγματος και το διαιρέτη ESR χρήσης της σήραγγας (Πίνακας 4-8).



Κατηγορίες αντιστήριξης

1 Ανυποστήρικτη
2 Σποραδική ήλωση
3 Συστηματική ήλωση
4 Συστηματική ήλωση και 40-50mm άοπλο ψεκαζόμενο σκυρόδεμα
5 Ινοπλισμένο ψεκαζόμενο σκυρόδεμα πάχους 50-90mm και ήλωση του πετρώματος
6 Ινοπλισμένο ψεκαζόμενο σκυρόδεμα πάχους 90-120mm και ήλωση του πετρώματος
7 Ινοπλισμένο ψεκαζόμενο σκυρόδεμα πάχους 120-150mm και ήλωση του πετρώματος
8 Ινοπλισμένο ψεκαζόμενο σκυρόδεμα πάχους >150mm, με νευρώσεις από οπλισμένο ψεκαζόμενο σκυρόδεμα και ήλωση του πετρώματος
9 Επένδυση από έγχυτο σκυρόδεμα

Σχήμα 4-23. Οδηγίες μόνιμης στήριξης για διάνοιξη με την NMT, βασιζόμενες στο δείκτη Q (Grimstad and Barton, 1993).

Πίνακας 4-8. Διαιρέτης χρήσης σήραγγας

	A	B	C	D	E	F
Χρή-ση	Προσωρινά μεταλλευτικά ανοίγματα	Φρέατα (α) κυκλικά (β) ορθογωνικά	Μόνιμα μεταλλεία, υδαταγωγοί, στοές	Θάλαμοι αποθήκευσης-επεξεργασίας, ήσσονες σήραγγες	Σταθμοί ισχύος, σήραγγες, καταφύγια, στόμια, συνδέσεις	Πυρηνικοί σταθμοί, Σιδηροδρομικοί σταθμοί, εργοστάσια
ESR	3÷5	2.5 (α) ÷ 2 (β)	1.6	1.3	1	0.8

Το μήκος L των ήλων στο θόλο ή στα πλευρά σήραγγας, αντίστοιχα, εξαρτώνται από τις διαστάσεις του ανοίγματος, και δίνονται από το διάγραμμα στο Σχήμα 4-23και από τη σχέση:

$$L[m] = 2 + 0.15 \cdot (B[m] \text{ ή } H[m])/ESR$$

(4-4)

όπου B το άνοιγμα για το θόλο, και H το ύψος της σήραγγας για τα πλευρά. Αντίστοιχα, οι αποστάσεις μεταξύ των ήλων εξαρτώνται από την ποιότητα του πετρώματος μόνο, και δίνονται από το ίδιο διάγραμμα. Η πίεση που καλούνται να αναλάβουν τα μέτρα στήριξης δίνεται από την:

$$p[kPa] = \frac{200}{J_r \cdot Q^{1/3}} \cdot \frac{\sqrt{min(J_n, 9)}}{3}$$

(4-5)

Ενόργανη παρακολούθηση της συμπεριφοράς του πετρώματος γενικά δεν απαιτείται, εκτός και αν πρόκειται για πολύ πτωχής ποιότητας πέτρωμα (δείκτης Q<0.01), ή το πλάτος της εκσκαφής είναι ιδιαίτερα μεγάλο, όπως κατά τη διάνοιξη του χειμερινού ολυμπιακού σταδίου (Barton, 1992b) του Gjøvik (πλάτος 62m, Q=1-30), όπου πραγματοποιήθηκε λεπτομερής ενόργανη παρακολούθηση μολονότι οι τιμές του δείκτη Q (Bhasin et al., 1993) ήταν υψηλές.

4.4 Υπόγειοι θάλαμοι

Μεμονωμένοι υπόγειοι θάλαμοι μπορούν σήμερα να έχουν διαστάσεις σημαντικές με πλάτη που πολλές φορές ξεπερνούν τα 30 m, ύψη της τάξης των 30 - 40 m, και μήκη που ξεπερνούν τα 100 m. Οι χώροι αυτοί είναι συνήθως τμήματα έργων που αποτελούνται από περισσότερους από ένα μεγάλους θαλάμους (caverns) τοποθετημένους παράλληλα μεταξύ τους, που ενώνονται με εγκάρσιες ή ελικοειδείς στοές.

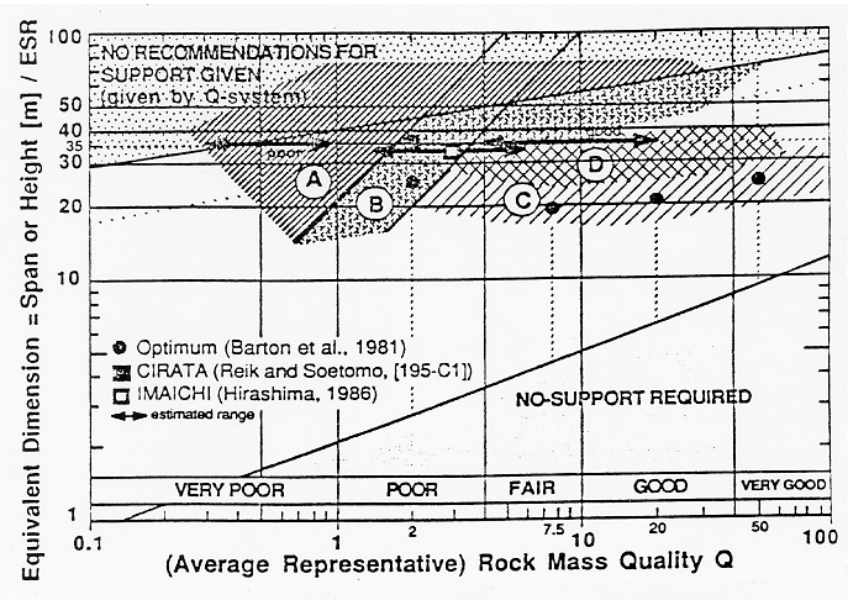
4.4.1 Γεωλογικές Συνθήκες - Σχεδιασμός Μεγάλων Υπόγειων Εκσκαφών.

Για την κατασκευή μεγάλων υπόγειων εκσκαφών κρίσιμη είναι η επιλογή της κατάλληλης θέσης. Η καταλληλότητά της εξαρτάται από τα γεωμηχανικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν τα περιβάλλοντα πετρώματα. Αυτά είναι (Kaizer, 1986):

- η λιθολογική σύσταση του πετρώματος και οι μηχανικές του παράμετροι (αντοχή, παραμορφωσιμότητα, κ..α.).
- η εντατική κατάσταση της βραχόμαζας.
- ο βαθμός κερματισμού των πετρωμάτων,
- τα χαρακτηριστικά των οικογενειών ασυνεχειών (προσανατολισμός, απόσταση μεταξύ τους, υλικό πλήρωσης, κ.α).
- η διαπερατότητα των γεωλογικών σχηματισμών και οι υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής.
- το βάθος από την επιφάνεια

Η χωροθέτηση, οι διαστάσεις και η μορφή αποτελούν τη βάση του σχεδιασμού του υπόγειου έργου. Συνήθως η τοποθέτησή του επιλέγεται σε σχετικά μικρό βάθος από την επιφάνεια και με προσανατολισμό του μεγαλύτερου άξονά του, ως προς το εντατικό πεδίο και τις ασυνέχειες, εκείνον που δημιουργεί τα μικρότερα δυνατά προβλήματα ευστάθειας και υπερεκσκαφής, αντίστοιχα. Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται και στον καθορισμό του πλάτους της εκσκαφής, ενώ η διατομή είναι συνήθως αψιδωτής ή πεταλοειδούς μορφής.

Στο διάγραμμα του σχήματος 1 (Barton et al.,1981) δίνεται η τεχνική και οικονομική εφικτότητα κατασκευής ενός υπόγειου έργου, με βάση την ποιότητα του πετρώματος Q και το άνοιγμα της διατομής της εκσκαφής.



Σχήμα 4-24. Δυνατότητες κατασκευής υπόγειων θαλάμων (Barton et al.,1981)

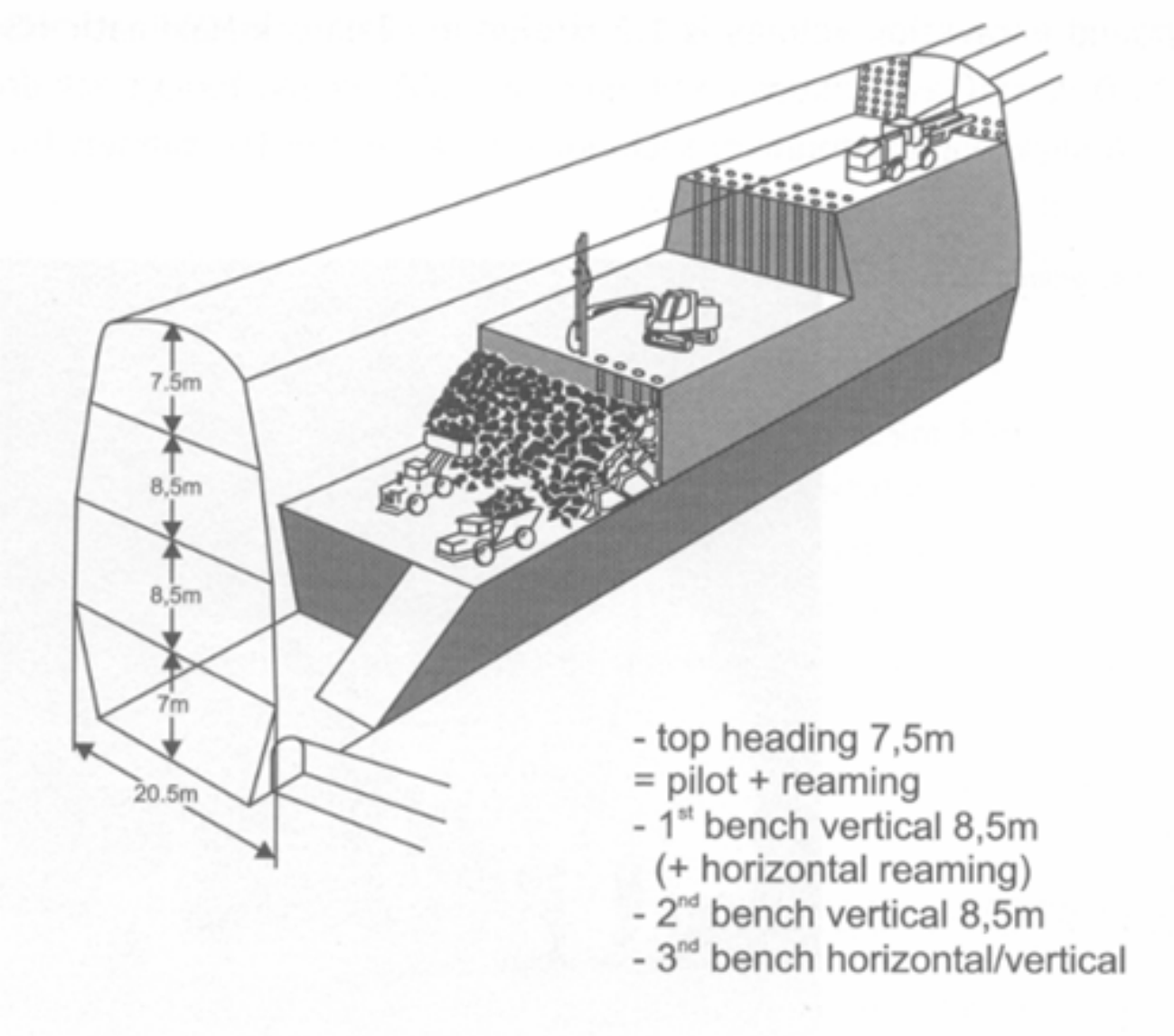
<u>Περιοχές Κατασκευής Υπόγειων Θαλάμων :</u>
A : Πολλοί κίνδυνοι. Δεν συνιστάται.
B : Πιθανώς εφικτή αλλά δύσκολη.
C : Πλέον οικονομική. Συνθήκες χαμηλού κινδύνου.
D : Συνθήκες φυσιολογικού κινδύνου.

4.4.2 Μέθοδοι Όρυξης - Υποστήριξης

Οι υπόγειοι θάλαμοι επιδιώκεται, γενικά λόγω του μεγέθους τους, να κατασκευάζονται σε ευσταθή πετρώματα. Η διάνοιξή τους επομένως ακολουθεί τις διαδικασίες που αναφέρθηκαν προηγουμένως, προσαρμοσμένες στις ανάγκες της μορφής τους. Κατά την όρυξη μεγάλων υπογείων εκσκαφών, λόγω των μεγάλων διαστάσεων τους (20-30m πλάτος και 25-40m ύψος) δεν είναι δυνατή η προσβολή όλης της διατομής σε μία μόνο φάση. Ακόμη, λόγω του μικρού σχετικά μήκους τους δεν κρίνεται οικονομικά συμφέρουσα η χρήση μηχανής ολομέτωπης κοπής. Εφαρμόζεται έτσι τμηματική όρυξη της εκσκαφής με ανατινάξεις ή σε ορισμένες περιπτώσεις με χρήση μηχανών σημειακής κοπής.

Η συνηθέστερη μέθοδος όρυξης (*Σχήμα 4-25*) περιλαμβάνει όρυξη του άνω τμήματος της εκσκαφής (θόλου) και κατόπιν εξόρυξη του υπόλοιπου τμήματος με τη μέθοδο των ορθών βαθμίδων (top heading and benching). Στην περίπτωση που η κατάσταση του πετρώματος δεν επιτρέπει την προσβολή όλου του ανώτερου τμήματος της εκσκαφής, τότε γίνεται τμηματική όρυξή του. Για το κατώτερο τμήμα, η όρυξη των διατρημάτων μπορεί να γίνει είτε οριζόντια είτε κατακόρυφα, οπότε διαμορφώνεται το ύψος των βαθμίδων 10 ή 15m αντίστοιχα. Οι βαθμίδες είναι συνήθως κατακόρυφες, άλλως μπορούν να έχουν μία μικρή κλίση μέχρι 3:1. Για την ελαχιστοποίηση προβλημάτων υπερεκσκαφής και για την όσο το δυνατόν μικρότερη διατάραξη της βραχομάζας, είναι δυνατή η εφαρμογή μεθόδων ελεγχόμενης όρυξης, όπως η μέθοδος λείων τοιχωμάτων (smooth blasting), η μέθοδος πρότμησης (presplitting) και η μέθοδος πυκνής διάτρησης (line drilling).

Η αρχική υποστήριξη των εκσκαφών γίνεται συνήθως με τη χρήση αγκυρίων ή συρματόσχοινων, προεντεταμένων ή μη. Η τοποθέτησή τους γίνεται, σύμφωνα με τις οδηγίες της μελέτης, είτε τοπικά σε σημεία που απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή (spot bolting) είτε συστηματικά. Η επόμενη φάση της υποστήριξης πραγματοποιείται με τη χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος με ή χωρίς την προσθήκη ινών χάλυβα. Είναι δυνατή επίσης, η προσθήκη μέσα στην επένδυση χαλύβδινου πλέγματος. Η χρησιμοποίηση χαλύβδινων πλαισίων συνήθως αποφεύγεται υπό κανονικές συνθήκες, σε περιπτώσεις όμως που υπάρχουν δυσχέρειες, προβλήματα καταπτώσεων ή αντιμετώπιση συνθλιβόντων εδαφών, η χρήση τους είναι επιβεβλημένη. Εκτός από τα παραπάνω μέσα υποστήριξης, μετά την πλήρη περάτωση της όρυξης μπορεί να υπάρξει τελική επένδυση του υπόγειου χώρου από σκυρόδεμα (lined cavern).



Σχήμα 4-25. Στάδια διάνοιξης υπόγειας αποθήκης πετρελαίου (TAMROCK, 1999)

4.5 Αριθμητική ανάλυση της συμπεριφοράς

Η βραχομάζα, ανάλογα με το δρών εντατικό πεδίο και το βαθμό τεκτονισμού της δύναται να κινδυνεύει είτε από καταπτώσεις τεμαχών της είτε από υπέρβαση της αντοχής της. Σύμφωνα με την BTS (2004, §3.3.2), συνιστάται τα συστήματα ταξινόμησης, όπως τα RMR και Q, χρησιμοποιούνται μόνον όταν δεν υπάρχει υπέρβαση της αντοχής της, οπότε ο υπολογιστικός έλεγχος δύναται να περιορίζεται στις δυνητικές καταπτώσεις μόνο. Διαφορετικά η βραχομάζα θα πρέπει να εξετάζεται ως συνεχές ή ασυνεχές μέσο και να ελέγχονται οι δυνητικές αστοχίες με αναλυτικές αριθμητικές μεθόδους.

Πίνακας 4-9. Εκτίμηση της αντοχής της βραχομάζας και του βάθους υπέρβασής της.

Τα συστήματα RMR και Q σχετίζονται (με σημαντικές αποκλίσεις) με την:

$RMR = 9 \cdot lnQ + 44$; *Μια καλύτερη συσχέτιση μέσω των δεικτών υφής δίνεται από τους Tzamos & Sofianos (2007)*

(α) Σύστημα Q.
Σύμφωνα με τους Singh & Goel (1999, §7.3), σύνθλιψη του πετρώματος δεν συμβαίνει για βάθη σηράγγων:

$$H[m] \le 350 \cdot \sqrt[3]{Q}\,;\ \sigma_{cm} = 700 \cdot \gamma \cdot \sqrt[3]{Q} \ \text{ή}\ H[m] \le 275 \cdot \frac{\sqrt[3]{Q_{SRF=1}}}{B^{0.1}};\ \ \sigma_{cm} = 550 \cdot \gamma \cdot \sqrt[3]{Q_{SRF=1}}/B^{0.1}$$

όπου Η το βάθος της σήραγγας, Β το πλάτος της σε [m], σ_{cm} (Singh & Goel, 1999, §13.3) η κινητοποιημένη μονοαξονική αντοχή της βραχομάζας σε MPa, και γ το μοναδιαίο βάρος της σε MN/m^3. Για μεγαλύτερα βάθη υφίστανται συνθήκες σύνθλιψης. Για B=~10m ο δεύτερος τύπος ταυτίζεται με τον πρώτο.

(β) Σύστημα RMR.
Μη υπέρβαση της αντοχής του πετρώματος πέριξ της σήραγγας, θεωρουμένης ως αξισυμμετρικής, συμβαίνει όταν:
(β1)

$$H < \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{c \cdot \cos\varphi}{1 - \sin\varphi}; \sigma_{cm} = \frac{2 \cdot c \cdot \cos\varphi}{1 - \sin\varphi}$$

Ο Πίνακας 4-6 στην τελευταία στήλη δίνει τις κορυφαίες (Singh & Goel, 1999, §6.4.2) τιμές των παραμέτρων αντοχής της βραχομάζας.
(β2) (Kalamaras & Bieniawski, 1995, in (Singh & Goel, §8.3))

$$H \le \frac{\sigma_{ci} \cdot exp\left(\frac{RMR - 100}{24}\right)}{2 \cdot \gamma}; \sigma_{cm} = \sigma_{ci} \cdot exp\left(\frac{RMR - 100}{24}\right)$$

(γ) Σύστημα GSI.
Η αντοχή της βραχομάζας δίνεται ως συνάρτηση της παραμέτρου GSI των ασυνεχειών, και των παραμέτρων μονοαξονικής αντοχής σ_{ci} και εσωτερικής τριβής m_i του άρρηκτου πετρώματος (Hoek & Marinos 2000).

$$H \le \frac{\sigma_{cm}}{2 \cdot \gamma}; \frac{\sigma_{cm}}{\sigma_{ci}} = 0.0034 \cdot m_i^{0.8} \cdot (1.029 + 0.025 \cdot e^{-0.1 \cdot m_i})^{GSI}; GSI \approx RMR_{89} - 5; m_i \in [4 \div 33]$$

Ακριβέστερη εκτίμηση της σ_{cm} δίνεται από τον κώδικα RockData της RocScience.
Για τους Ελληνικούς ασβεστόλιθους και ψαμμίτες δίνονται μέσες τιμές από τους Sabatakakis et al.(2008): σ_{ci}: 68 & 53 MPa και m_i: 20 & 17, αντίστοιχα.

(δ) Με προσομοίωση
Η διατομή θεωρείται ισοδύναμο συνεχές ελαστικό μέσο.
Η αντοχή υπολογίζεται από τα συστήματα ταξινόμησης. Ορθολογικότερο θεωρείται το GSI.
Στη συνέχεια ο έλεγχος υπέρβασης πραγματοποιείται αριθμητικά.

Σημείωση:
Οι τιμές που δίνονται για την αντοχή και τη μη σύνθλιψη της βραχομάζας από τα εμπειρικά συστήματα, διαφέρουν. Για παράδειγμα, για πτωχή βραχομάζα με Q=1, RMR=44, GSI=39 –m_i=17 – σ_{ci}=53 MPa, οι αντοχές που υπολογίζονται από τα (α), (β1), (β2), (γ) είναι 18, 7, 5, 6 MPa αντίστοιχα, και τα βάθη στα οποία δεν ξεπερνιέται η αντοχή είναι 350, 144, 103, 126m, αντίστοιχα. Οι τιμές των τριών τελευταίων, επειδή έχουν κοινή προέλευση, συγκλίνουν.

Οι έλεγχοι των δυνητικών αστοχιών με αριθμητικές μεθόδους απαιτούν την προεπιλογή των φάσεων εκσκαφής και τοποθέτησης της υποστήριξης, εφόσον απαιτείται. Αυτή δύναται να προεκτιμείται από οδηγίες όπως της προηγούμενης ενότητας. Με τις αριθμητικές μεθόδους ελέγχονται η συμπεριφορά του περιβάλλοντος πετρώματος και των μέτρων στήριξης τους, και τελικά η ευστάθεια του έργου. Για τις αναλυτικές επιλύσεις,

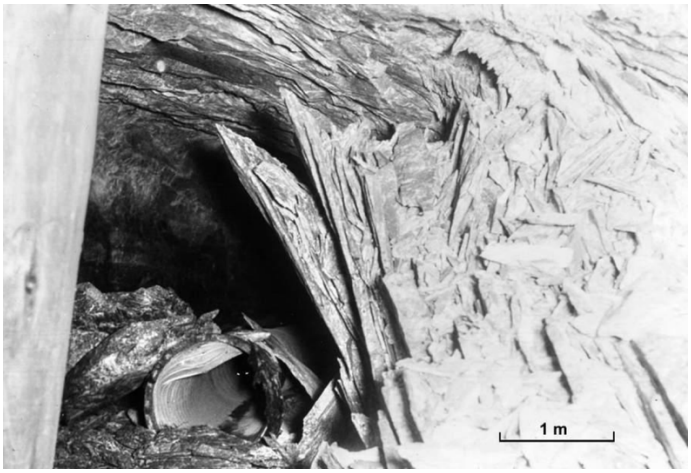
οι υπολογιστικές παράμετροι επιλέγονται για την κατηγορία βραχομάζας που προκύπτει χωρίς τη θεώρηση δυσμενών παραγόντων (Singh & Goel, 1999, §6.6) που λαμβάνονται άμεσα υπόψη στους υπολογισμούς, όπως η πίεση του νερού ή η διεύθυνση των ασυνεχειών.

4.5.1 Κατάπτωση ή ολίσθηση τεμάχους

Εφόσον υφίσταται δυνητικός κίνδυνος πτώσης τεμαχών, όπως συμβαίνει στην περίπτωση που το πέτρωμα είναι ισχυρό και αραιά διακλασμένο, απαιτείται ο υπολογιστικός έλεγχος της ευστάθειας των ασταθών αυτών τεμαχών. Προς τούτο οι διευθύνσεις των ασυνεχειών τοποθετούνται σε στερεογραφικό διάγραμμα στο οποίο τοποθετείται και η διεύθυνση της σήραγγας. Στη συνέχεια ακολουθεί η ανάλυση της συμπεριφοράς των τεμαχών που σχηματίζονται, λαμβάνοντας υπόψη τις μηχανικές ιδιότητες των ασυνεχειών, το μέγεθος της σήραγγας, το εντατικό πεδίο εφόσον κρίνεται απαραίτητο, και την επιθυμητή ασφάλεια. Η εργασία αυτή δύναται να εκτελείται από κώδικες υπολογιστικούς, όπως οι DIPS και UNWEDGE. Πολυπλοκότερες αναλύσεις επιτυγχάνονται από τον κώδικα UDEC. Επεξηγηματική εφαρμογή της αναλυτικής διαδικασίας δίνεται από το Σοφιανό (2015, κεφάλαιο 5).

4.5.2 Θραύση ισχυρής βραχομάζας σε θέση συγκέντρωσης τάσης

Σε ισχυρό συμπαγές πέτρωμα, λόγω του σχήματος της σήραγγας και του υφιστάμενου εντατικού πεδίου είναι δυνατόν να υπάρχουν θέσεις στην περιφέρειά της στις οποίες δημιουργείται συγκέντρωση υψηλών τάσεων. Εφόσον οι τάσεις αυτές υπερβαίνουν την αντοχή του ισχυρού πετρώματος, αυτό αστοχεί βίαια τοπικά (Σχήμα 4-26). Σε σχετικά μεγάλα βάθη μια τέτοια αστοχία εκλύει σημαντική καταστροφική ενέργεια χωρίς την ύπαρξη προειδοποιητικών μετατοπίσεων. Απαιτείται επομένως ο εντοπισμός αυτών των ζωνών, εφόσον υπάρχουν, και ο προσδιορισμός του εύρους των. Η ανάλυση επιτυγχάνεται με τη θεώρηση της βραχομάζας ως ελαστικού μέσου, εντός του οποίου προσδιορίζονται οι μεμονωμένες περιοχές υπέρβασης της αντοχής. Εφόσον το εύρος των περιοχών αυτών κρίνεται μικρό, και ότι τα λαμβανόμενα μέτρα είναι επαρκή για την ασφάλεια, ο σχεδιασμός της διάνοιξης γίνεται αποδεκτός. Η εργασία αυτή δύναται να εκτελείται από κώδικες υπολογιστικούς, όπως οι PHASE και FLAC. Αμφότεροι οι κώδικες δύνανται να προσομοιώνουν και την ύπαρξη μεμονωμένων ασυνεχειών στο πέτρωμα. Επεξηγηματική εφαρμογή της αναλυτικής διαδικασίας δίνεται από το Σοφιανό (2015, κεφάλαιο 7).



(α) Αποτέλεσμα έκρηξης πετρώματος σε βαθύ επίπεδο χρυσωρυχίου στη Ν. Αφρική



(β) Διατρημένο κατακόρυφο φρέαρ σε σκληρό πέτρωμα βαθιού μεταλλείου

Σχήμα 4-26. Ψαθυρή θραύση τοιχωμάτων

4.5.3 Διαρροή κατακερματισμένης βραχομάζας

Εφόσον οι αποστάσεις μεταξύ των ασυνεχειών είναι μικρές, πχ <5% του πλάτους του ανοίγματος του υπόγειου έργου, και η πίεση που ασκείται επάνω στην επένδυση δύναται να θεωρηθεί ως συνεχώς κατανεμημένη, τότε το πεδίο των τάσεων και μετατοπίσεων στο πέτρωμα δύναται να προσεγγιστεί ως συνεχές. Κατ' αυτόν τον τρόπο η τεκτονισμένη βραχομάζα δύναται να θεωρηθεί ως ισοδύναμο συνεχές μέσο, με μειωμένες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με το άρρηκτο πέτρωμα. Οι μειωμένες αυτές μηχανικές ιδιότητες δύνανται να λαμβάνονται από συστήματα ταξινόμησης, όπως αυτά που αναφέρθηκαν στην αρχή της ενότητας, οι υποδείκτες των οποίων βασίζονται στη γεωτεχνική έρευνα. Η υπέρβαση της αντοχής της βραχομάζας σε αυτήν την περίπτωση προκαλεί γενικά μικρές ολισθήσεις ή και περιστροφές του άρρηκτου πετρώματος μεταξύ των ασυνεχειών, οι οποίες δεν είναι βίαιες, και καταγράφονται υπολογιστικά ως συνεχείς πλαστικές παραμορφώσεις. Τα τοποθετούμενα μέτρα στήριξης στοχεύουν στον έλεγχο αυτών των παραμορφώσεων σε αποδεκτά όρια. Η ανάλυση της συμπεριφοράς της βραχομάζας σε διάδραση με τα μέτρα στήριξης δύναται να εκτελείται από κώδικες υπολογιστικούς, όπως οι PHASE και FLAC, οι οποίοι όπως προαναφέρθηκε, εφόσον απαιτείται, δύνανται να προσομοιώνουν και μεμονωμένες ασυνέχειες στο πέτρωμα. Επεξηγηματική εφαρμογή της αναλυτικής διαδικασίας δίνεται από το Σοφιανό (2015, κεφάλαιοα 8-10).

Βιβλιογραφία

Barton N & Grimstad E (1994). "Rock mass conditions dictate choice between NMT and NATM", Tunnels & Tunnelling, October.

Barton N, Grimstad E, Aas G, Opsahl OA, Bakken A, Pedersen L, and Johansen ED (1992a). "Norwegian Method of Tunnelling", World Tunnelling, June.

Barton N. (2000). "TBM tunneling in jointed and faulted rock, ch. 19", A.A. Balkema.

Barton N., Loset F., Lien R., Lunde J. 1981, "Application of Q-System in Design Decisions Concerning Dimensions and Appropriate Support for Underground Installations", Rockstore '80, Stockholm, Vol. 2, pp.553-561

Barton, N. R., By, T. L., Chryssanthakis, L., Tunbridge, L., Kristiansen, J.,Loset, F., Bhasin, R. K., Westerdhal, H. and Vik, G. (1992b). Comparison of prediction and performance for a 62m span sports hall in jointed gneiss. Proc. 4th Int. Rock Mech. and Rock Eng. Conf., Torino, Paper 17.

Barton, N. R., Lien, R. and Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mechanics 6(4), 189-239.

Bell FG (2004). Engineering Geology and Construction, CRC Press

Berta G (1990). "Explosives: an engineering tool", Milano Italesplosivi

Bhasin R, Barton N, Loset F (1993). "Engineering Geological Investigations and the application of rock mass classification approach in the construction of Norway's underground Olympic Stadium", Engineering Geology, 35, 93-101.

Bieniawski ZT (1973). "Engineering Classification of Jointed Rock Masses" Transactions, South African Institution of Civil Engineers, 15, 12, pp. 335-344.

Bieniawski ZT (1989). "Engineering rock mass classifications - A complete manual for engineers and geologists in Mining, Civil and Petroleum Engineering", 251 p., J. Wiley.

Bouvard –Lecoanet A, Colombet G, Esteulle F (1992). "Ouvrages Souterrains, Conception-Réalisation-Entretien", Presses Ponts et chaussées.

Brady BHG and Brown ET (2005). "Rock Mechanics for Underground Mining, ch. 17", Kluwer Academic Publishers, Springer Science.

Bristow N. (1988). “Computer control of drilling and tunnelling machines”, Trans. IMM, Section A, A44-A46.

BTS (2004) “Tunnel Lining Design Guide”, ICE

Chryssanthakis P, Barton N, Loset F, Dallas A, Mitsotakis K (1998). “Application of Norwegian Method of Tunnelling in weak rocks in Western Greece”, Int. J. of Rock Mech. & Min. Sci. 35:4-5.

Crandall FJ (1960). “Transmission coefficient for ground vibration due to blasting”, J. Boston Soc. Civ. Engrs., 47, No.2, April.

Deere DU, Peck RB, Parker H, Monsees JE, Schmidt B (1970). “Design of Tunnel Support Systems”, Highway Research Record, 339, 26-33.

ΕΛΟΤ (2012). ΤΠ 1501-12-02-01-01 Υπόγεια εκσκαφή σηράγγων με συμβατικά μέσα (ΦΕΚ Β'2221 30 Ιουλίου 2012)

Froise S. 1987, “Hydrocarbon Storage in Unlined Rock Caverns: Norway's Use and Experience”. Tunelling and Underground Space Technology, Vol. 2.

Grimstad, E. and Barton, N. (1993). Updating of the Q-System for NMT. Proc. of the Int. Symp. on Sprayed Concrete, Fagernes, Norway. Norwegian Concrete Association, 46-66, Balkema, Rotterdam.

Hagan TN (1979) “Understanding the burn cut - a key in greater advance rates”, Tunnelling '79, IMM, 273-279.

Hoek E and Marinos P (2000). “Predicting squeeze”, Tunnels & Tunnelling International, November, 45-51

Hosoien N. 1986, “Crude Oil Caverns at Mongstad, Norway”, Proc. of Int. Symp.on Large Rock Caverns, Helsinki, Finland, Vol. 1, pp.109-120

Jasson B., Winqvist T. 1977, “Planning of Subsurface Use”. Pergamon Press

Kaiser P.K. 1986, “General Report”. Proc. of Int. Symp.on Large Rock Caverns, Helsinki, Finland, Vol. 3, pp.1877-1907

Καραλής Ν. (2007). «Σήραγγες Περιφερειακής Υμηττού, Αττικής Οδού», Διπλωματική εργασία, Τομέας Μεταλλευτικής ΕΜΠ.

Karanam UMR and Misra B (1998). “Principles of Rock Drilling”, Taylor & Francis Group

King EH (1996). “Rock tunnels”; In: Tunnel Engineering Handbook, Chapter 7,122- 152, Eds. J.O. Bickel, T.R. Kuesel and E.H. King, I.T.P. , 542 p.

Kukkonen J (2008). The art of drill plan design. World Tunnel Congress – Underground facilities for better Environment and Safety, India, pp. 1017-1023

Lauffer H (1958). „Gebirgsklassifizierung für den Stollenbau”, Geologie und Bauwesen, 24, 1, pp. 46-51.

Leet LD (1960) “Vibrations from blasting rock, Harvard University Press.

Liddel HG & Scott R (-). “Μέγα λεξικόν της ελληνικής γλώσσης, μετάφραση Ξ. Μόσχος, επιστ. Μ. Κωνσταντινίδης, Τόμος IV, Ι. Σιδέρης, Αθήνα

Macias FJ and Dahl F (2016). “Cutter assessments”, Tunnelling Journal, Oct-Nov, pp. 34-39.

Mather W (1999). “Drill and Fire design and practice”, Course on tunnel construction and design module 1, BTS, Egham, Surrey.

Nilsen B, Dahl F, Holzhäuser J, Raleigh P (2006). “Abrasivity testing for rock and soils”, Tunnels & Tunnelling International, April, pp. 47-49.

NONEL (2003). “User’s Manual”, Dyno Nobel.

Palmstrom (1996). “Characterizing rock masses by the RMi for use in practical rock engineering: Part 1: The development of the Rock Mass index (RMi)”, TUST, Volume 11, Issue 2, April, Pp 175–188.

Puhakka T (1988) “Computer-aided drilling for tunnelling accuracy and economy”, Tunnelling '88, IMM, 257-263.

Sabatakakis N, Koukis G, Tsiambaos G, Papanakli S (2008). Index properties and strength variation controlled by microstructure for sedimentary rocks. Engineering Geology, Volume 97, Issues 1–2, Pages 80-90

Singh B and Goel RK (1999). “Rock Mass Classification – A Practical Approach in Civil Engineering”, Elsevier, 267p.

Σοφιανός ΑΙ (2015). «Υποστήριξη Υπογείων Έργων», ΣΕΑΒ.

Σοφιανός ΑΙ και Μαρίνος ΠΓ (1990). "Εμπειρικές μέθοδοι ταξινόμησης της βραχομάζας και εφαρμογή τους στον σχεδιασμό της αντιστήριξης σηράγγων", Δελτίο του ΚΕΔΕ, 107-108, 109-133.

TAMROCK (1997). “Underground Drilling and Loading Handbook”, ed. Puhakka T, Tamrock Corp.

TAMROCK (1999). “Rock Excavation Handbook, for Civil Engineering”, ed. Heinio M, Sandvik Tamrock Corp.

Ταταράκης Λ (2012). «Μηχανική Συμπεριφορά της Σήραγγας Καλυδώνας κατά τη διάνοιξή της», Διπλωματική Εργασία, Σχολή ΜΜΜ/ΕΜΠ.

TBG and STUVA (1989). “Safe Working in Tunnelling”, ITA-AITES

Terzaghi K (1946). “Introduction to tunnel geology”; In: “Rock tunnelling with steel supports”, Eds. R.V Proctor and T.L. White, The Commercial Shearing and Stamping Company, Youngstown, Ohio.

Tzamos S and Sofianos AI (2007). “A correlation of four rock mass classification systems through their fabric indices”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, vol. pp .

Τσουτρέλης ΧΕ (1997). «Εκρηκτικές ύλες και Τεχνική των ανατινάξεων», Τόμος 1ος Εκρηκτικές ύλες», σελ. 285, Πανεπιστημιακές εκδόσεις ΕΜΠ.

Τσουτρέλης ΧΕ (2001). «Εκρηκτικές ύλες και Τεχνική των ανατινάξεων», Τόμος 2ος Τεχνική των ανατινάξεων», σελ. 417, Πανεπιστημιακές εκδόσεις ΕΜΠ.

Whittaker BN & Frith RC (1990). “Tunnelling, Design, Stability and Construction”, IMM.

Wickham GE, Tiedemann HR, and Skinner EH (1972). “Support determination based on Geologic Predictions”, Proceedings Rapid Excavation and Tunneling Conference, AIME, New York, pp. 43-64.

Zhao J., Choa V., Broms B.B. 1996, “Construction and Utilization of Rock Caverns in Singapore, Part B”. Tunelling and Underground Space Technology, Vol. 11, No. 1

Κριτήρια αξιολόγησης

Κριτήριο αξιολόγησης 1

(α) Σήραγγα αυτοκινητοδρόμου (ESR=1) διαμέτρου εκσκαφής D=10m διανοίγεται σε ασβεστολιθικό πέτρωμα μέτριας ποιότητας Q=4 ή RMR=55. (i) Να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά της διάνοιξης με τα δύο συστήματα, (ii) Σχεδιάστε, σύμφωνα με το σύστημα RMR, τη διατομή εκσκαφής και τα μέτρα άμεσης υποστήριξης, για απόσταση μεταξύ των γραμμών A και B, 150mm.

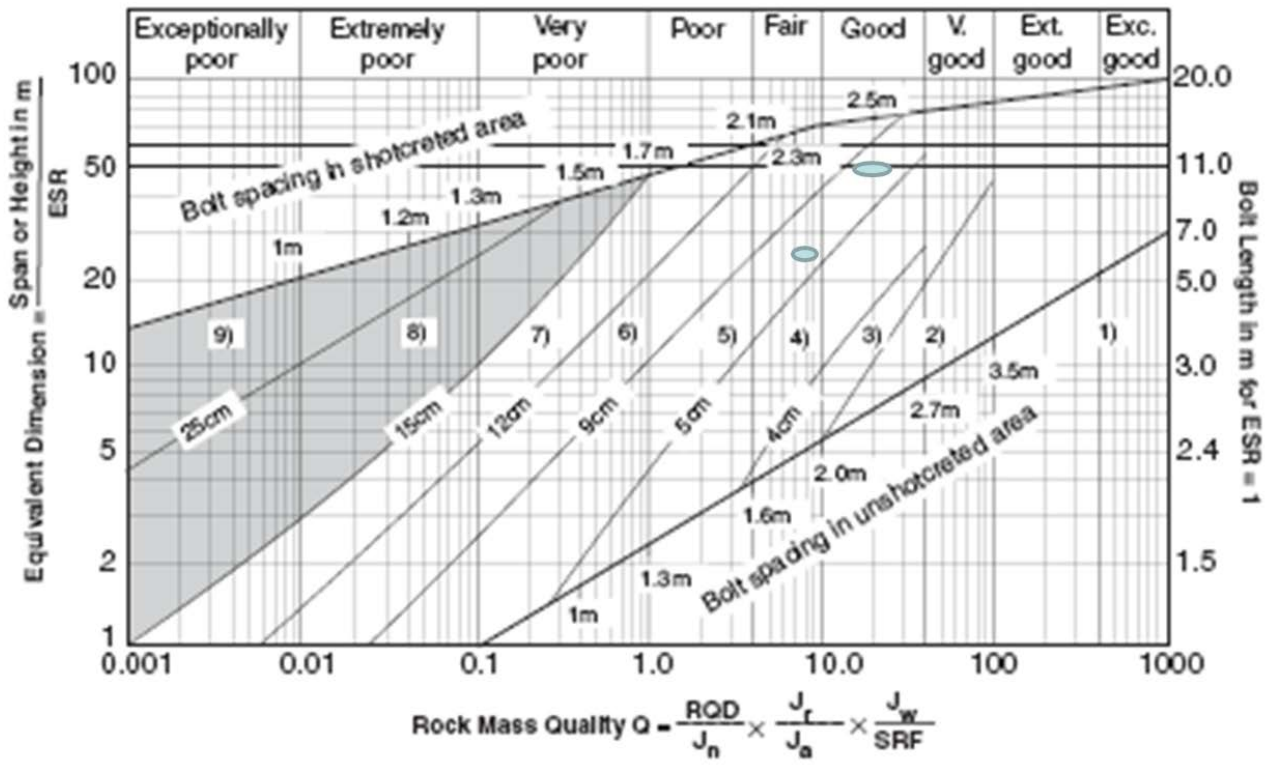
Απάντηση/Λύση

(i) Σύστημα Q. Σύμφωνα με το διάγραμμα στο Σχήμα 4-23, τα αγκύρια διατάσσονται σε αποστάσεις s=2.1 m. Το μήκος τους είναι L=2+0.15x10=3.50m. Η επένδυση είναι από εκτοξευμένο σκυρόδεμα, άοπλο, πάχους t_s=50mm.
Σύστημα RMR: Πίνακας 4-6.

(β) Υδροηλεκτρικό έργο (ESR=1) κατασκευάζεται σε χαλαζιακό φυλλίτη με ποιότητα Q=6÷10 ή (RMR=60÷65). Το πλάτος εκσκαφής του θαλάμου είναι 25m, το ύψος εκσκαφής του 50m, και η οροφή έχει σχήμα αψίδας. Ο θάλαμος βρίσκεται σε 450m βάθος (Singh & Goel, 2006, p.150). (i) Προτείνετε το σύστημα της στήριξης. (ii) Σχεδιάστε τις φάσεις εκσκαφής και τα μέτρα άμεσης υποστήριξης, για απόσταση μεταξύ των γραμμών A και B, 200mm.

Απάντηση/Λύση

(i) Επειδή H=450m<350$Q^{0.33}$=700m, η βραχομάζα δεν κινδυνεύει από σύνθλιψη. Επομένως, με βάση το επόμενο διάγραμμα:
Στην οροφή, για B/ESR=25m, Q=6 έως 10=> L=6m, s=2.2m, t=90mm
Στα τοιχώματα, για B/ESR=50m, Q_w=(6 έως 10)x2.5=> L=11m, s=2.5m, t=70mm



Σχήμα 4-27. Διάγραμμα υποστήριξης συστήματος Q, για το παράδειγμα.

(γ) Υπόγειος θραυστήρας πλάτους 15m, διανοίγεται σε νορίτη, ποιότητας Q=4.5, σε βάθος 2100m (Hoek et al, 1995, p40). Προτείνετε τα μέτρα στήριξης.

Απάντηση/Λύση

Επειδή πρόκειται για μόνιμο μεταλλευτικό άνοιγμα, εμπίπτει στην κατηγορία ESR=1.6. Άρα, D_e=15/1.6=9.4. Από το διάγραμμα (Σχήμα 4-23) προκύπτει ότι η εκσκαφή εμπίπτει στην κατηγορία (4) που απαιτεί άοπλο εκτοξευμένο σκυρόδεμα πάχους 40-50mm, και συστηματική ήλωση σε κάναβο 2.1m, μήκους L=2+0.15·15/1.6≈3.5m.

Κριτήριο αξιολόγησης 2

Δίδυμη δίιχνη οδική σήραγγα κεντρικού αυτοκινητοδρόμου με ΑΕΑ (26t), μήκους 2400m κάθε κλάδου, θα διανοιχτεί με ανατινάξεις, σε μέγιστο βάθος 100m μέσα σε φλύσχη. Στην περιοχή του μέγιστου βάθους εκτιμάται ότι η βασική ποιότητα του πετρώματος (με βάση τους πρώτους πέντε υποδείκτες) RMR_{basic}=40. Οι στρώσεις είναι περίπου οριζόντιες. Οι αναμενόμενες συγκλίσεις είναι 5cm, και η μόνιμη επένδυση θα έχει πάχος 30cm.

α. Στη θέση του μέγιστου βάθους, εκτιμείστε την ποιότητα του πετρώματος RMR, και δώστε στη θέση αυτή σε κλίμακα 1:100 σκαρίφημα του εσωραχείου της σήραγγας και της υποστήριξης, για διάνοιξη σε δύο φάσεις.

β. Εκτιμείστε τον απαιτούμενο αριθμό και τύπο εξόδων διαφυγής, τις εσοχές έκτακτης στάθμευσης που απαιτούνται, και τη μέγιστη επιτρεπόμενη κλίση.

γ. Εκτιμείστε τον απαιτούμενο μηχανολογικό εξοπλισμό.

Απάντηση/Λύση

α1.	Βαθμοί
RMR(basic):	40
Οριζόντιες στρώσεις (κλίση 0ο) (0-20 μέτρια)	-5
Σύνολο:	35
Κατάταξη IV	(πτωχό 40-21)

α2. 9.55 περιτύπωμα στη βάση, 11.55 m συνολικά
4.5 m ύψος περιτυπώματος

α3. Συστηματικές ηλώσεις 4μ μήκος, σε αποστάσεις 1.5 μ στη στέψη και στα τοιχώματα και πλέγμα.
εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 100μμ στη στέψη και 50μμ στα τοιχώματα
Χωρίς πλαίσια.

β.

Έξοδοι διαφυγής	6, εκ των οποίων οι 2 για οχήματα
Εσοχές	2-3
Μέγιστη επιτρεπόμενη κλίση 2%	

Θέμα. Σήραγγα σε σκληρό πέτρωμα

Δίδυμη σήραγγα μήκους 522m και διατομής που δίνεται στο Σχήμα 4-28α κατασκευάζεται σε τμήμα της Εγνατίας Οδού. Η σήραγγα διανοίγεται εξ' ολοκλήρου στο σχηματισμό των παχυστρωματωδών λεπτόκοκκων ψαμμιτών του πινδικού φλύσχη (Σχήμα 4-28β), των οποίων το πάχος των στρώσεων κυμαίνεται από 0.3 έως και 5m. Οι ψαμμίτες που θα συναντηθούν παρουσιάζουν ασθενή τεκτονισμό και αποσάθρωση, η οποία περιορίζεται στις επιφάνειες των ασυνεχειών. Η παράταξη των ψαμμιτικών στρωμάτων είναι σχεδόν παράλληλη με τους άξονες ενώ η βραχόμαζα εκτός από τη στρώση διατέμνεται και από συστήματα διακλάσεων.

Αναλυτικότερα, στα πρώτα μέτρα της διαδρομής της σήραγγας, η στρώση παρουσιάζεται με γεωμετρικά στοιχεία B:44^0/040^0. Τα συστήματα διακλάσεων στο κεντρικό τμήμα έχουν γεωμετρικά στοιχεία J1:72^0/298^0, J2:64^0/152^0 και J3:62^0/250^0. Τα συγκεκριμένα συστήματα διακλάσεων περιλαμβάνουν ασυνέχειες με πολύ μικρή εμμονή (<1m), πολύ μικρό άνοιγμα (<0.1mm), απόσταση ασυνεχειών 1 m, ομαλές έως τραχείες και ελαφρά αποσαθρωμένες επιφάνειες. Προχωρώντας προς την έξοδο της σήραγγας, οι παραπάνω ασυνέχειες διαφοροποιούνται ποσοτικά και ποιοτικά ως εξής: B:48^0/043^0, J1:42^0/227^0, J2:52^0/159^0, J3:81^0/302^0 και J4:80^0/037^0. Τα συγκεκριμένα συστήματα διακλάσεων περιλαμβάνουν ασυνέχειες με μικρή εμμονή (1-3m), άνοιγμα έως 5mm, απόσταση ασυνεχειών 0.6÷0.1 m, τραχείες και ελαφρά αποσαθρωμένες επιφάνειες, και είναι συνήθως πληρωμένες με ιλυολιθικό υλικό πάχους <5mm. Γενικά ο τεκτονισμός της βραχόμαζας αναμένεται ασθενής στο επίπεδο διέλευσης της δίδυμης σήραγγας.

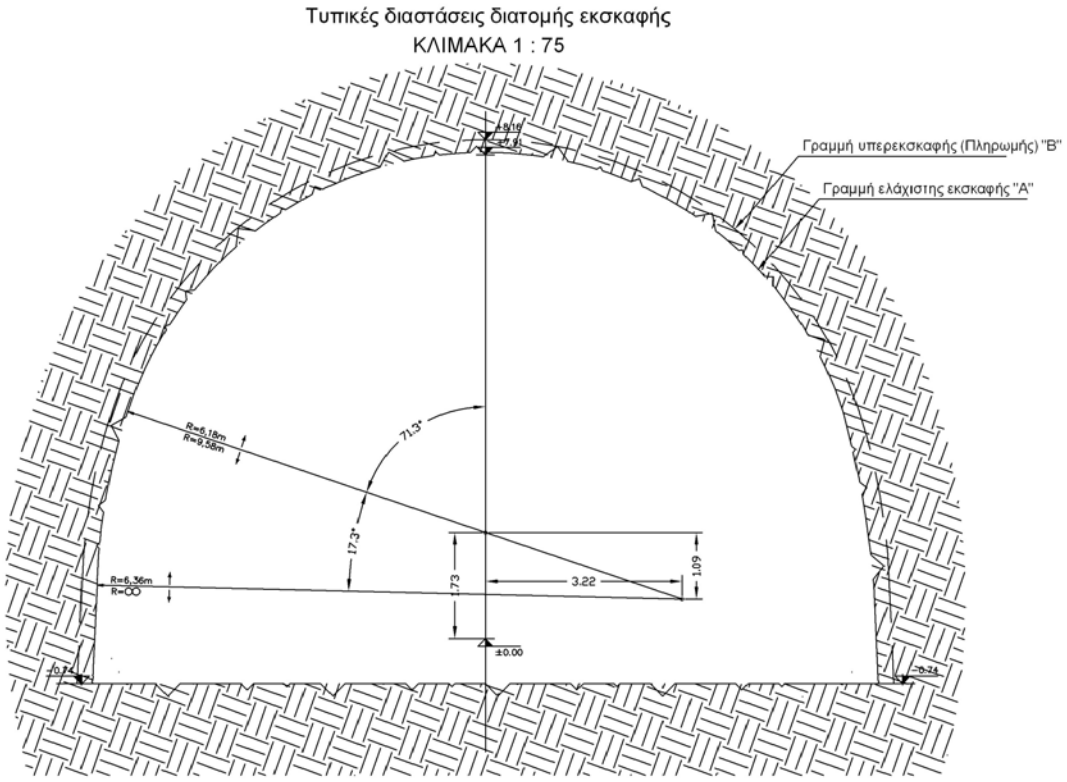
Η πυρηνοληψία (TCR) προσέγγισε το 100%. Στις γεωτρήσεις ο μέσος δείκτης RQD είναι ~75% στο κεντρικό τμήμα και ~70% στα ακριανά τμήματα. Το φαινόμενο βάρος του σχηματισμού μετρήθηκε 26kN/m^3. Οκτώ δοκιμές μοναξονικής θλίψης υπέδειξαν σχηματισμό "ισχυρό" δίνοντας μέση τιμή αντοχής (σ_{ci}) 74MPa. Το μέσο μέτρο ελαστικότητας (E) και ο μέσος λόγος Poisson (ν) προσδιορίστηκαν 35GPa και 0.30, αντίστοιχα. Τέσσερις δοκιμές αντοχής σε εφελκυσμό (Brazilian test) κατέδειξαν μέση τιμή αντοχής (σ_{ti}) 6.0MPa. Δώδεκα δοκιμές σημειακής φόρτισης έδωσαν μέση τιμή δείκτη ($Is_{(50)}$) 4MPa. Σε όλο το μήκος της χάραξης, ο άξονας ακολουθεί περίπου την παράταξη των στρωμάτων ή την τέμνει με μικρή οξεία γωνία. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην είναι δυνατό να τηρηθεί η διατομή εκσκαφής της σήραγγας, λόγω των υπερεκσκαφών στο δεξιό τμήμα της άνω ημιδιατομής.

Στους ψαμμίτες αναμένεται περιορισμένη περιοδική υδροφορία οφειλόμενη στο σημαντικό συντελεστή κατείσδυσης, και στην άμεση απόκριση, μέσω του δικτύου των ασυνεχειών, στα βρόχινα νερά. Στο επίπεδο της σήραγγας δεν αναμένονται σημαντικές ποσότητες υπόγειου νερού, καθόσον οι ψαμμίτες της περιοχής εκτιμάται ότι αποστραγγίζονται πολύ χαμηλότερα υψομετρικά, στο επίπεδο της κοίτης του Μετσοβίτικου ποταμού. Σημειώνεται πως σύμφωνα με τα υδρολογικά στοιχεία της περιοχής το μέσο ύψος των κατακρημνισμάτων ξεπερνάει τα 2000mm.

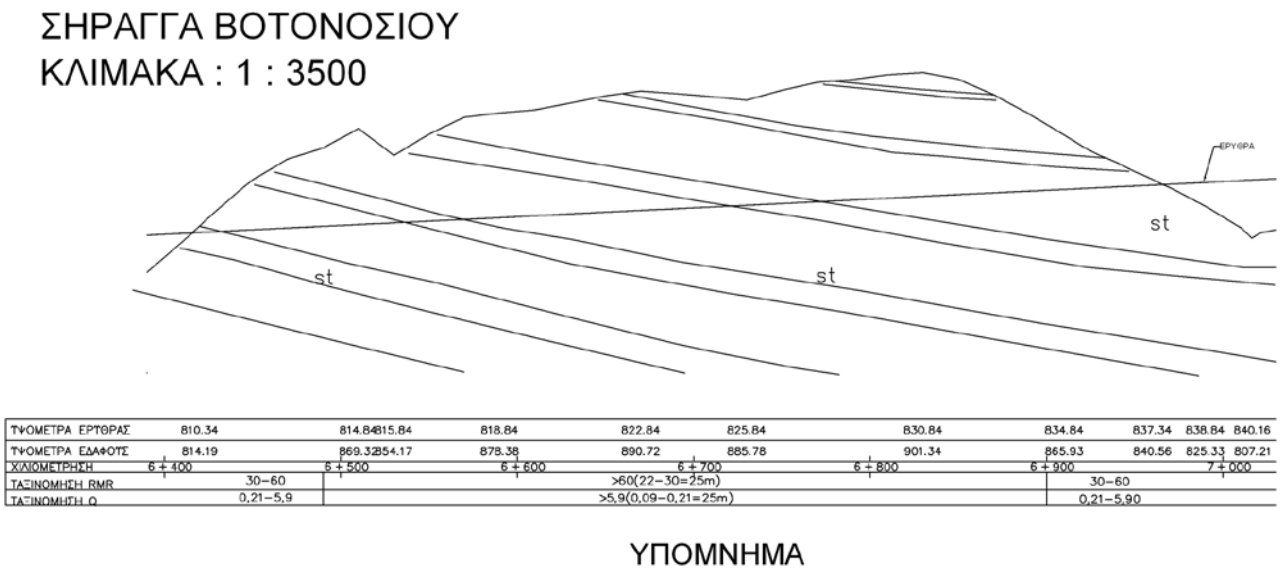
Η περιοχή των στομίων εισόδου της σήραγγας δομείται από τους παχυστρωματώδεις ψαμμίτες του Πινδικού φλύσχη. Ο σχηματισμός αυτός παρουσιάζεται με στρώματα ψαμμίτη, κυρίως μεγάλου πάχους, μέχρι και 5m. Ενδιάμεσα στους ψαμμιτικούς πάγκους παρεμβάλλονται ιλυολιθικές ενστρώσεις ή ιλυολιθικοί υμένες πάχους λίγων mm ενίοτε έως 30cm. Οι χαλαροί σχηματισμοί που καλύπτουν το βραχώδες ψαμμιτικό υπόβαθρο έχουν πολύ μικρό πάχος και σε αρκετά σημεία απουσιάζουν εντελώς. Πρόκειται κυρίως για υλικά του μανδύα αποσάθρωσης.

Βάσει των στοιχείων που δίδονται ανωτέρω και αφορούν στις επί τόπου συνθήκες κατά μήκος του άξονα της εν λόγω σήραγγας, ζητείται να προσδιορισθούν και αιτιολογηθούν τα εξής:

1. **Η θέση έναρξης και πέρατος της σήραγγας**
2. **Ο δείκτης RMR της βραχομάζας**
3. **Η τεχνική όρυξης σε κάθε τμήμα.**
4. **Τα απαιτούμενα μέτρα προσωρινής υποστήριξης**
5. **Το είδος του μηχανολογικού εξοπλισμού (διάτρηση, υποστήριξη, αποκόμιση, αερισμός) και η επιλογή του διατρητικού μηχανήματος.**
6. **Να δοθεί σχέδιο ανατίναξης της Α΄ φάσης της εκσκαφής.**



(α) Διατομή εκσκαφής σήραγγας



ΥΨΟΜΕΤΡΑ ΕΡΤΘΡΑΣ	810.34	814.84	815.84	818.84	822.84	825.84	830.84	834.84	837.34	838.84	840.16
ΥΨΟΜΕΤΡΑ ΕΔΑΦΟΤΣ	814.19	869.32	854.17	878.38	890.72	885.78	901.34	865.93	840.56	825.33	807.21
ΧΛΙΟΜΕΤΡΗΣΗ	6 + 400	6 + 500		6 + 600	6 + 700		6 + 800	6 + 900		7 + 000	
ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ RMR	30–60	>60(22–30=25m)						30–60			
ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ Q	0,21–5,9	>5,9(0,09–0,21=25m)						0,21–5,90			

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

ΖΩΝΗ ΠΙΝΔΟΥ ΦΛΥΣΧΗΣ (Παλαιόκαινο - Αν. Ηώκαινο).

st ΠΑΧΥΣΤΡΩΜΑΤΩΔΕΙΣ ΨΑΜΜΙΤΕΣ. Συμπαγείς, γκρίζοι ψαμμίτες σε στρώσεις και πάγκους πάχους 0,3m έως 8 m.

—— Γεωλογικό όριο,

(β) Γεωλογική μηκοτομή σήραγγας

Σχήμα 4-28. Τυπική διατομή και μηκοτομή εκσκαφής της σήραγγας

Κεφάλαιο 5

Σύνοψη
Πρόκειται για διαδοχική μέθοδο διάνοιξης μέσα σε μαλακούς σχηματισμούς. Αρχικά αναπτύσσονται τα διαδοχικά στάδια της μεθόδου, ο απαιτούμενος εξοπλισμός για την εκσκαφή, και δίνονται παραδείγματα εφαρμογών. Στη συνέχεια δίνονται οι μέθοδοι διάνοιξης και η μελέτη τους, με βάση τις αναμενόμενες παραμορφώσεις και τις απαιτήσεις περιορισμού τους. Το κεφάλαιο κλείνει με οδηγίες για την ανάλυση των επιλεγμένων μεθόδων διάνοιξης με αριθμητικές μεθόδους. Η εμπέδωση επιτυγχάνεται με ασκήσεις και θέμα εφαρμογής.

Προαπαιτούμενη γνώση
Μαθήματα: Εξόρυξη Πετρωμάτων, Μηχανική Πετρωμάτων, Υποστήριξη Υπογείων Έργων. Χρήσιμη βιβλιογραφία. Maidl et al. (2013), ICE (1996).

5. Συμβατική διάνοιξη με μηχανικά μέσα

5.1 Εισαγωγή

Σε περίπτωση που οι προς εκσκαφή σχηματισμοί είναι πτωχής ποιότητας και εκτιμάται ότι θα υπάρξουν σοβαρά προβλήματα ευστάθειας της διατομής της σήραγγας, η συμβατική διάνοιξη εκτελείται μόνον με μηχανικά μέσα, έτσι ώστε η διαταραχή των περιβαλλόντων σχηματισμών να είναι η ελάχιστη δυνατή. Χρήση μηχανικών και μόνον μέσων γίνεται και στην περίπτωση που η συμβατική διάνοιξη πραγματοποιείται σε μαλακά υλικά όπου δεν είναι αποδοτική η χρήση εκρηκτικών. Επίσης χρήση μηχανικών μέσων επιβάλλεται όταν απαγορεύεται για οποιονδήποτε λόγο η χρήση εκρηκτικών (ΕΛΟΤ, 2009). Μηχανικά μέσα είναι: οι φρέζες (Roadheaders) που χρησιμοποιούνται σε συμπαγέστερους σχηματισμούς, οι εκσκαφείς (τσάπες-excavators) που χρησιμοποιούνται σε εδαφικούς σχηματισμούς, και οι σφύρες που χρησιμοποιούνται για την τοπική εκσκαφή σκληρών πετρωμάτων, συνήθως στην περιφέρεια του ανοίγματος.

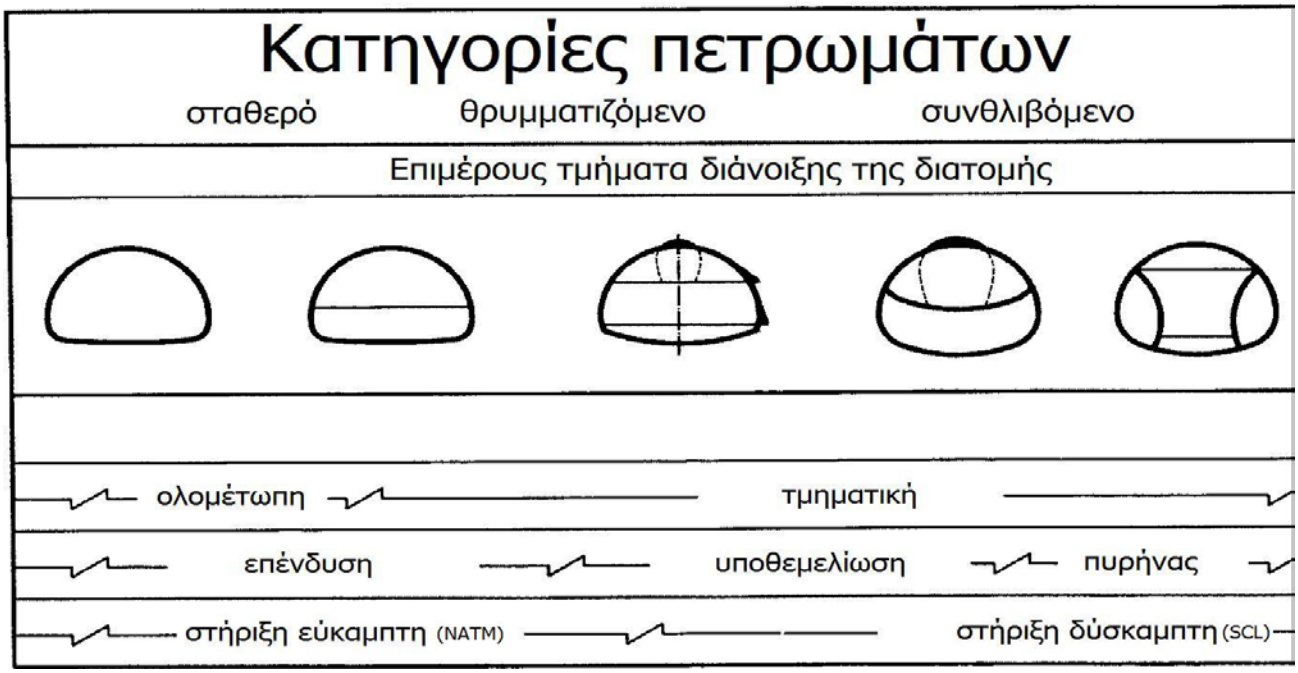
Εφόσον η γεωμάζα είναι ασθενής, κάτω από την πίεση του δευτερογενούς εντατικού πεδίου παραμορφώνεται και εισβάλει στη σήραγγα γρήγορα ή αργά και καταστρέφει τη σήραγγα. Σήραγγα μέσα σε αυτή τη γεωμάζα απαιτεί στήριξη. Η πίεση που ασκείται στη στήριξη ονομάζεται πίεση γεωμάζας (ground or earth pressure). Στα πλαίσια της σηραγγοποιίας, μαλακή γεωμάζα ορίζεται η γεωμάζα που απαιτεί υποστήριξη μετά από την εκσκαφή, προκειμένου να εξασφαλιστεί η σταθερότητά της και να περιοριστεί η παραμόρφωσή της. Στις μαλακές γεωμάζες συμπεριλαμβάνονται τα κερματισμένα (jointed, blocky – nachbrüchig, gebräch) και τα συνθλίβοντα (squeezing – druckhaft) πετρώματα-εδάφη. Πετρώματα σκληρά και συμπαγή τα οποία συμπεριφέρονται ψαθυρά δεν περιλαμβάνονται στην κατηγορία αυτή. Αντίθετα, οι τρέχουσες κοκκώδεις και οι διογκούμενες γεωμάζες, είναι ασθενείς γεωμάζες, των οποίων η συμπεριφορά ελέγχεται επιπροσθέτως από άλλους μηχανισμούς, που απαιτούν πρόσθετα μέτρα κατά τη διάνοιξη.

Η επιλεγμένη μέθοδος διάνοιξης της σήραγγας, ο βαθμός δυσκολίας και το επακόλουθο κόστος καθορίζονται πρωταρχικά από τον χρόνο ευστάθειας του εδαφικού υλικού. Αυτός εξαρτάται από το υφιστάμενο εντατικό πεδίο, την ποιότητα του πετρώματος και το μέγεθος του υπόγειου ανοίγματος. Η ποιότητα του πετρώματος δύναται να βελτιωθεί, εφόσον τούτο απαιτείται, το κόστος όμως είναι μεγάλο και αποτελεί έσχατη λύση. Αντίθετα, η τμηματική εξόρυξη της διατομής (σε αντίθεση με την ολομέτωπη), αποτελεί συνήθη πρακτική, που με το διαχωρισμό της διατομής σε πολλαπλά μέτωπα, μειώνει το ενεργό μέγεθος του ανοίγματος και επιτυγχάνει βελτίωση των συνθηκών ευστάθειας. Όμως, η επιλογή της τεχνικής κατασκευής μιας σήραγγας δεν απορρέει μόνο από κριτήρια τεχνικό-γεωλογικά ή της μηχανικής των πετρωμάτων, αλλά και από οικονομικά και τεχνογνωσίας. Έτσι είναι δυνατόν κατά τη φάση των προσφορών αλλά και κατά την κατασκευή μίας σήραγγας να μελετηθούν από τους συμμετέχοντες στη προσφορά πολλές εναλλακτικές μέθοδοι, οι οποίες πρέπει να προδιαγράφονται λεπτομερώς.

Εφόσον το έμπροσθεν μέτωπο της σήραγγας είναι ευσταθές μέχρι το επόμενο βήμα εκσκαφής, ο έλεγχος της διαδικασίας της διάνοιξης περιορίζεται στην ευστάθεια των τοιχωμάτων της σήραγγας. Η ανυποστήρικτη περιοχή πλησίον του μετώπου θεωρείται ότι στηρίζεται μέχρι της τοποθέτησης της επένδυσης

μπροστά μεν στο πέτρωμα του μετώπου της σήραγγας, πίσω δε στην ήδη τοποθετημένη επένδυση. Η παρακολούθηση με μετρήσεις περιορίζεται στη συμπεριφορά των πετρωμάτων και της σήραγγας γύρω από αυτήν.

Οι μέθοδοι διαδοχικής διάνοιξης με μηχανικά μέσα ανήκουν στη γενικότερη κατηγορία των μεθόδων εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Spritzbetonverfahren, Sprayed Concrete Methods), τις μεθόδους δηλαδή που χρησιμοποιούν το υλικό αυτό ως το βασικό μέτρο άμεσης στήριξης. Η διαδικασία της κατασκευής περιλαμβάνει τις διαδοχικές φάσεις της εξόρυξης και της υποστήριξης. Η επιλογή της μεθόδου εξόρυξης εξαρτάται βασικά από την αντοχή-σκληρότητα και τον τεκτονισμό της γεωμάζας. Στο Σχήμα 5-1 δίνονται γενικές οδηγίες διαμερισμού της διατομής της σήραγγας με βάση την αναμενόμενη συμπεριφορά της γεωμάζας. Η επιλογή της ακολουθίας των φάσεων της διάνοιξης εξαρτάται από το βαθμό υπερφόρτισής της.



Σχήμα 5-1. Διαμέριση του μετώπου με βάση την κατηγορία της γεωμάζας (Maidl, 2004)

5.2 Μηχανές κοπής

Η εκσκαφή με μηχανικά μέσα πραγματοποιείται από μηχανές σημειακής κοπής, όπως η σφύρα, ο εκσκαφέας, και οι διαφόρων τύπων φρέζες.

5.2.1 Σφύρα

Στο Σχήμα 5-2α φαίνεται η κοπή του πετρώματος στο μέτωπο σήραγγας από υδραυλική σφύρα. Η απόδοση της είναι πολύ χαμηλή, και χρησιμοποιείται σε σκληρά πετρώματα είτε όταν απαγορεύονται οι ανατινάξεις ή υπάρχει υποεκσκαφή (remining) της σήραγγας είτε για το θρυμματισμό βραχωδών όγκων εντός μαλακών σχηματισμών. Την θραύση του πετρώματος στο μέτωπο σήραγγας, από μία υδραυλική σφύρα της Socomec Rock Breaker μπορείτε να παρακολουθήσετε στο συνημμένο βίντεο.

5.2.2 Εκσκαφέας

Ο εκσκαφέας (backhoe) αποτελείται από το φορείο που κινείται πάνω σε ελαστικοφόρους τροχούς ή σε ερπύστριες, τον βραχίονα και τον κάδο εκσκαφής. Οι εκσκαφείς στα υπόγεια έργα είναι ειδικής διαμόρφωσης, με βραχίονα που να δύναται να περιστρέφεται και κατά τον άξονα της σήραγγας (*Σχήμα 5-2*), ώστε να διαμορφώνει την περιφέρεια της διατομής.



(α) Υδραυλική σφύρα της Atlas Copco για τη θραύση σκληρών πετρωμάτων στο μέτωπο σήραγγας



(β) Ευέλικτος, ισχυρός εκσκαφέας σηράγγων της Schaeff Terex που χρησιμοποιείται για την αποτελεσματική διάνοιξη μαλακού σχηματισμού στο μέτωπο σήραγγας

Σχήμα 5-2. Συμβατικές μηχανές σημειακής κοπής πετρωμάτων

5.2.3 Φρέζα

Οι φρέζες (roadheader) δύνανται να εξορύσσουν πετρώματα αντοχής μέχρι 120 MPa (από περίπου 70 MPa η φθορά των κοπτικών εργαλείων αρχίζει να γίνεται αντιοικονομική) και διατομές που γενικά δεν ξεπερνούν τα 42 m^2.



(α) Μηχανή με κεφαλή διαμήκους κοπής



(β) Μηχανή με κεφαλή εγκάρσιας κοπής

Σχήμα 5-3. Φρέζες (Roadheders)

Η φρέζα αποτελείται από το φορείο που κινείται πάνω σε ερπύστριες, τον βραχίονα και την κοπτική κεφαλή. Η κοπή πραγματοποιείται από δόντια καρβιδίου βολφραμίου που διατάσσονται σπειροειδώς στην κοπτική κεφαλή. Την περιμετρική κοπή του πετρώματος σήραγγας μπορείτε να παρακολουθήσετε στο συνημμένο βίντεο. Τα όρια σκληρότητας του πετρώματος εξαρτώνται από τη ικανότητα κοπής των κοπτών. Μερικοί τύποι μηχανών ενσωματώνουν στην κεφαλή εκτοξευτές υψηλής πίεσης ύδατος που βοηθούν στην κοπή του πετρώματος. Τα μπάζα συλλέγονται σε ποδιά και προωθούνται σε μεταφορικό ιμάντα για την απομάκρυνσή τους. Διάφορους τύπους φρεζών, καθώς και τα συστήματα συλλογής των μπαζών μπορείτε να παρακολουθήσετε στο επόμενο βίντεο. Οι φρέζες διακρίνονται σε τέσσερις ομάδες:

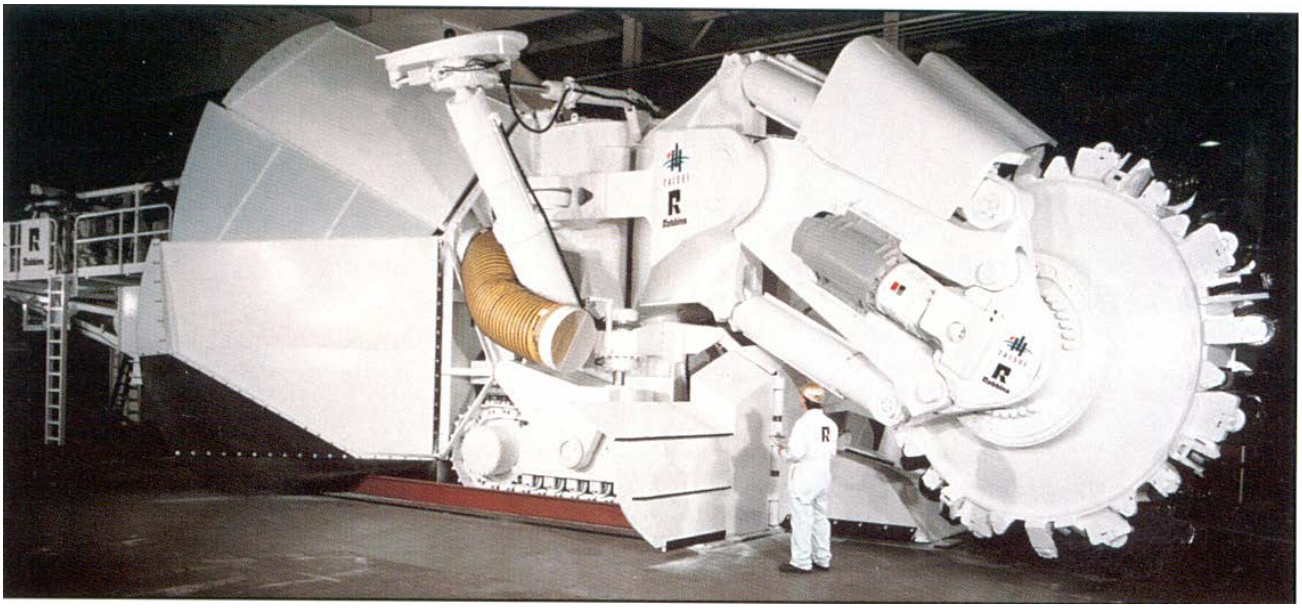
α) Μηχανές με κεφαλή διαμήκους κοπής (σπειροειδής κεφαλή). Η κοπτική κεφαλή περιστρέφεται στο άκρο γύρω από τον άξονα του βραχίονα και κόβει το πέτρωμα παράλληλα προς τον άξονα της σήραγγας (*Σχήμα 5-3*, αριστερά).

β) Μηχανές με κεφαλή εγκάρσιας κοπής (κεφαλή διπλού τυμπάνου). Η κοπτική κεφαλή διαμορφώνεται ως διπλό στρεφόμενο τύμπανο με τους δύο κοπτικούς κυλίνδρους εκατέρωθεν του διαμήκους άξονος του προβόλου να περιστρέφονται περί άξονα κάθετο στον βραχίονα (*Σχήμα 5-3*, δεξιά).

γ) Ένας ή περισσότεροι βραχίονες, με κοπτικές κεφαλές, στερεωμένοι σε ασπίδα . Οι περισσότερες κοπτικές κεφαλές είναι κατάλληλες για σήραγγες μεγάλης διαμέτρου σε σαθρό πέτρωμα.

δ) Μηχανές με μεγάλη κεφαλή (τροχός) εγκάρσιας κοπής (Mobile Miner της Robbins, Σχήμα 5-4). Αυτή αποτελείται από ένα πλαίσιο επάνω σε ερπύστριες και έναν κοντό βραχίονα στον οποίο βρίσκεται τοποθετημένος κατακόρυφα τροχός που φέρει κοπτικούς δίσκους στην περιφέρεια. Ο άξονας του κοπτικού τροχού σχηματίζει ορθή γωνία με τον άξονα της σήραγγας, και οι κοπτικοί δίσκοι έχουν άξονες παράλληλους σε αυτόν του τροχού της κοπτικής κεφαλής. Ο βραχίονας σαρώνει το μέτωπο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εκσκάψει ευρεία ποικιλία διατομών σηράγγων ή θαλάμων σε πετρώματα σκληρότερα από αυτά της κοινής φρέζας. Όπως η φρέζα, και το Mobile Miner μπορεί να κόψει διατομή σήραγγας με επίπεδο δάπεδο, που είναι ιδιαίτερο πλεονέκτημα για τον εξοπλισμό υποστήριξης που ακολουθεί την προχώρηση του μετώπου.

Τελευταίες έρευνες απέδειξαν ότι η αρχή κοπής των κεφαλών εγκάρσιας κοπής υπερέχει σε λειτουργικές ιδιότητες των κεφαλών διαμήκους κοπής, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις συμπαγών πετρωμάτων. Οι μηχανές μικρής ισχύος κοπής (ισχύς κίνησης κοπτικού τυμπάνου) μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε σχηματισμούς αντοχής σε θλίψη μέχρι 30 MPa. Οι μηχανές ισχύος μέχρι 100 kW μπορούν να εργαστούν οικονομικά σε πετρώματα μέχρι 80 MPa. Με 200 kW μπορούν να εργαστούν σε πετρώματα μέχρι 100 MPa. Τα σύγχρονα μηχανήματα με κοπτική ισχύ 400 kW μπορούν να εργαστούν και σε πετρώματα 120 MPa.



Σχήμα 5-4. Mobile miner

Για την προστασία από τη σκόνη, εκτός από διάφορες εξελιγμένες διατάξεις μείωσης της σκόνης, τα μηχανήματα είναι εξοπλισμένα με δικό τους σύστημα αποκονίωσης και με πρόσθετο σύστημα μείωσης του θορύβου. Η τροφοδότηση της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται με υψηλή τάση (π.χ. 1000 V/50 Hz) από ένα σταθερό εξέλικτρο καλωδίου.

Ο τύπος AMT 70 της ALPINE χρησιμοποιήθηκε στην Ελλάδα κατά τη δοκιμαστική διάνοιξη 900 m σε βάθος 7-13m, στο τμήμα Σεπόλια-Αττική της γραμμής 2, τα έτη 1987-1989, από την κοινοπραξία ΟΛΥΜΠΙΑΚΟ ΜΕΤΡΟ. Το μηχάνημα μπορούσε να σκάψει μέτωπο διαστάσεων ύψους μέχρι 7.5m (μέχρι 7.9m με ανύψωση κατά 300 mm τον πυργίσκου του προβόλου κοπής) και πλάτους μέχρι 9.5m. Το υδραυλικό σύστημα είχε εναλλακτικές επιλογές κίνησης με συμβατικό ηλεκτροκινητήρα ή κινητήρα ντίζελ. Το μηχάνημα ήταν εξοπλισμένο με σύστημα ανύψωσης και τοποθέτησης τόξων αντιστήριξης και πρόβολο για την εκτόξευση σκυροδέματος. Μπορούσε επίσης να εξοπλισθεί με διατρητικό μηχάνημα. Ήταν κατάλληλο για πετρώματα αντοχής σε θλίψη μέχρι 60 MPa. Η διάμετρος της κοπτικής κεφαλής ήταν 850mm, η δύναμη ώθησης η οποία ασκούνταν από τις ερπύστριες ήταν 200kN, η πίεση του υδραυλικού συστήματος 150-160bar, η εγκαταστημένη ισχύς 395kW, η ισχύς κοπής 236kW (τάση 1000 V/50 Hz) και το συνολικό βάρος 60t.

Πίνακας 5-1. Ωριαίες αποδόσεις μηχανών σημειακής κοπής Anderson

Πέτρωμα	Αντοχή MPa	Κατανάλωση κοπτικών m^3/κοπτικό	Απόδοση κοπής Ισχύς kW 49	90
Αργιλικό	5	250	60	100
Αμμώδης μάργα	20	50	50	75
Μάργα	40	35	26	35
Αργιλικός σχιστόλιθος	50	25	24	35
Εναλλαγές ψαμμίτη-σχιστόλιθου	50	20	20	30
Ψαμμίτης	50	15	20	30
Πηλίτης	50	15	15	25
Σιδηρομετάλλευμα	50	15	15	25
Αργιλικός σχιστόλιθος	60	25	15	25
Γύψος	60	25	15	25
Μάργα	50	20	12	20
Ιλυόλιθος	80	15	8	20
Ιλυόλιθος	90	10	6	15
Ψαμμίτης	100	3	3	10

Τα σύγχρονα μηχανήματα σημειακής κοπής εξοπλίζονται με διατρητικό μηχάνημα για την κατασκευή διερευνητικών ή ενισχυτικών διατρημάτων στο μέτωπο και στα τοιχώματα για την τοποθέτηση αγκυρίων. Επίσης, εξοπλίζονται με διάταξη τοποθέτησης τόξων και προκατασκευασμένων στοιχείων σκυροδέματος. Τα μεγαλύτερα μηχανήματα φέρουν διάταξη εκτόξευσης σκυροδέματος. Ο χειρισμός των διατάξεων αυτών γίνεται με υδραυλικό σύστημα το οποίο επιτρέπει και χειρισμό εξ αποστάσεως. Για την καθοδήγηση του μηχανήματος εφαρμόζονται συστήματα Η/Υ με οθόνη και δέσμη laser. Τέλος, οι κοπτικοί κύλινδροι και βραχίονες είναι δυνατό να τοποθετηθούν σε κοινά σκαπτικά μηχανήματα για να χρησιμοποιηθούν σε λεπτομερέστερες εργασίες κοπής, όπως η ευθυγράμμιση των τοιχωμάτων, του θόλου και του δαπέδου της εκσκαφής, προκειμένου να βελτιωθεί το σχήμα της τελικής διατομής.

Η ωριαία απόδοση του μηχανήματος (m^3/h) συνηθίζεται να δίνεται σε συνάρτηση της μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη του πετρώματος που χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα χαμηλή έως ιδιαίτερα υψηλή. Ο Πίνακας 5-1 δίνει τις ωριαίες αποδόσεις μικρών μηχανών των εργοστασίων Anderson, που ενσωματώνονται σε ασπίδα, σε συνάρτηση της μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη.

5.3 Ορεινές σήραγγες

Η συμβατική διάνοιξη σηράγγων, εκτός αστικών περιοχών, πραγματοποιείται με τις μεθόδους εκτοξευμένου σκυροδέματος. Οι μέθοδοι αυτές ακολουθούν είτε τις αρχές της νέας αυστριακής μεθόδου (NATM) είτε της νέας ιταλικής μεθόδου (ADECO-RS). Κατά την εφαρμογή των αρχών των μεθόδων αυτών εκτιμάται η παραμόρφωση της υπό διάνοιξη σήραγγας, και η μέθοδος διάνοιξης επιλέγεται σύμφωνα με αυτήν.

5.3.1 Παραμόρφωση της γεωμάζας

Στις παραμορφώσιμες γεωμάζες η συμπεριφορά της σήραγγας εκτιμάται από τη δυνατότητα παραμόρφωσής της. Για το σκοπό αυτό κατ' αρχάς εκτιμάται η αντοχή των γεωυλικών κατά μήκος της σήραγγας είτε έμμεσα με χρήση αποδεκτών συστημάτων (π.χ. GSI), είτε άμεσα με εργαστηριακές δοκιμές. Επίσης, με βάση το βάθος της σήραγγας εκτιμάται η ένταση του εντατικού πεδίου. Στη συνέχεια, με χρήση αναλυτικών μεθόδων υπολογίζονται οι παραμορφώσεις και οι ζώνες πλαστικοποίησης κατά μήκος της σήραγγας χωρίς να λαμβάνονται υπόψη μέτρα υποστήριξης. Κατ' αυτόν τον τρόπο εκτιμάται το δυναμικό υπερφόρτισης του πετρώματος και της σύνθλιψης της σήραγγας. Το δυναμικό αυτό σχεδιάζεται σε διαγράμματα υπερκειμένου σήραγγας – παραμορφώσεων και υπερκειμένου σήραγγας – ζωνών πλαστικοποίησης κατά μήκος της σήραγγας χωρίς μέτρα υποστήριξης. Ο προκαταρκτικός υπολογισμός των κατηγοριών μέτρων υποστήριξης και αντίστοιχης προσφερόμενης πίεσης για τις διάφορες κατηγορίες δυναμικού υπερφόρτισης πραγματοποιείται στη βάση εμπειρικών οδηγιών ή μεθόδων. Εφόσον το επιτόπου εντατικό πεδίο δεν προκαλεί υπερφόρτιση του πετρώματος και παραμόρφωση της σήραγγας, η επιλογή της μεθόδου διάνοιξης θα λάβει υπόψη της τις τυχόν

δομικές αστάθειες του πετρώματος. Αντίθετα, εφόσον υπάρχει υπερφόρτιση της γεωμάζας, αυτή θα συνεπάγεται μεγάλο δυναμικό παραμόρφωσής της, και ως εκ τούτου κίνδυνο σύνθλιψης της υποστήριξης και καταστροφής της σήραγγας. Από τη δυνατότητα (Hoek, 2001) και δριμύτητα της σύνθλιψης της υποστήριξης διέπεται ο σχεδιασμός της διάνοιξης στις υπερφορτιζόμενες σήραγγες.

5.3.1.1 Ορισμός της σύνθλιψης

Ως σύνθλιψη της γεωμάζας ορίζεται από την επιτροπή της Διεθνούς Ένωσης Βραχομηχανικής (Barla, 1995) «Η χρονικά εξαρτημένη μεγάλη παραμόρφωση, που εμφανίζεται γύρω από μία σήραγγα ή άλλο υπόγειο άνοιγμα, και είναι ουσιαστικά συνδεμένη με τον ερπυσμό που προκαλείται λόγω υπέρβασης της διατμητικής αντοχής. Η παραμόρφωση δύναται να τερματίζει κατά τη διάρκεια της κατασκευής ή να συνεχίζει για μεγάλο χρονικό διάστημα.» Ο ορισμός αυτός συμπληρώνεται με τις ακόλουθες προτάσεις:

- Η σύνθλιψη μπορεί να συμβεί και στα πετρώματα και στα εδάφη,
- Το μέγεθος της σύγκλισης της σήραγγας λόγω σύνθλιψης, ο ρυθμός παραμόρφωσης και η έκταση της ζώνης διαρροής γύρω από τη σήραγγα, εξαρτώνται από τις γεωλογικές συνθήκες, το επί τόπου εντατικό πεδίο σε σχέση με την αντοχή της γεωμάζας, τη ροή του νερού και την πίεση των πόρων, και τις ιδιότητες της γεωμάζας.
- Η σύνθλιψη της γεωμάζας μπορεί να οφείλεται τόσον στη διαρροή του άρρηκτου πετρώματος όσον και στη διαρροή των ασυνεχειών
- Η σύνθλιψη είναι συνώνυμη της υπερφόρτισης και δεν περιλαμβάνει παραμορφώσεις που προκαλούνται από τη χαλάρωση στην οροφή ή τα τοιχώματα σηράγγων σε διακλασμένες βραχομάζες.
- Φαινόμενα εκτίναξης πετρωμάτων δεν ανήκουν στη σύνθλιψη.
- Χρονικά εξαρτώμενες μετατοπίσεις γύρω από σήραγγες, παρόμοιου μεγέθους με τη σύνθλιψη, μπορεί επίσης να εμφανιστούν σε πετρώματα ευαίσθητα στην διόγκωση. Η διόγκωση είναι μία φυσικοχημική διεργασία κατά την οποία η αύξηση του όγκου οφείλεται στη διείσδυση του αέρα και της υγρασίας στο πέτρωμα Αντίθετα, η σύνθλιψη είναι μία μηχανική διεργασία. Εν τούτοις, σε ορισμένες περιπτώσεις η σύνθλιψη μπορεί να σχετίζεται με τη διόγκωση.

Η σύνθλιψη (της επένδυσης) ή ελαστοπλαστική πίεση (που ονομάζεται επίσης γνήσια πίεση της γεωμάζας "echter Gebirgsdruck – genuine ground pressure"), κινητοποιείται λόγω διαρροής της ασθενούς γεωμάζας γύρω από μία σήραγγα υπό την επίδραση των υψηλών πιέσεων των υπερκείμενων ή των τεκτονικών τάσεων. Η ζώνη υπερφόρτισης της γεωμάζας, διαρρέει εκεί όπου η εφαπτομενική τάση υπερβαίνει την κινητοποιημένη μονοαξονική της αντοχή. Η διαδικασία της διαρροής ταξιδεύει τότε σταδιακά από την παρειά της σήραγγας προς το εσωτερικό της ανυποστήρικτης γεωμάζας. Η ζώνη διαρροής της γεωμάζας καλείται και θραυσμένη ζώνη. Αυτή η ζώνη διαστέλλεται λόγω των νέων κατακλάσεων. Ένα σύστημα υποστήριξης μετά την εγκατάστασή του συγκρατεί το κλείσιμο της σήραγγας και φορτίζεται από το περιβάλλον πέτρωμα. Η σύγκλιση της σήραγγας είναι τόσο στιγμιαία όσο και εξαρτημένη από το χρόνο. Η διαχρονική μετατόπιση είναι αυτή που δεσπόζει σε κερματισμένες βραχομάζες κάτω από υψηλά υπερκείμενα, ιδιαίτερα όταν διαμορφώνεται μία ζώνη κατάκλασης γύρω από το άνοιγμα. Η υποστήριξη προσπαθεί να περιορίσει αυτές τις εξαρτώμενες από το χρόνο συγκλίσεις της σήραγγας και ως εκ τούτου προσελκύει υψηλά φορτία. Ο Terzaghi (1946) υποστήριξε ότι η πίεση υποστήριξης για συνθλίβουσες βραχομάζες είναι υψηλότερη για μεγαλύτερα υπερκείμενα και είναι ευθέως ανάλογη προς το πλάτος της σήραγγας.

Σύμφωνα με τον Hoek (2010) υπάρχει άμεση συσχέτιση μεταξύ του μεγέθους της παραμόρφωσης ε_{ns} της ανυποστήρικτης και ε_{sp} της υποστηριζόμενης σήραγγας ακτίνας R, και της σχετικής αντοχής ή του *συντελεστή υπερφόρτισης* N_s:

$$\varepsilon_{ns} = \frac{\delta_{i,ns}}{R} = 0.002 \cdot \left(\frac{\sigma_{cm}}{p_0}\right)^{-2} = 0.0005 \cdot N_s^2 ; N_s = \frac{2 \cdot p_0}{\sigma_{cm}}$$

$$\varepsilon_{sp} = \frac{\delta_{i,ns}}{R} = \left(0.002 - 0.0025\frac{p_i}{p_0}\right) \cdot \left(\frac{\sigma_{cm}}{p_0}\right)^{\left(2.4 \cdot \frac{p_i}{p_0} - 2\right)} = \left(0.002 - 0.0025\frac{p_i}{p_0}\right) \cdot \left(\frac{2}{N_s}\right)^{\left(2.4 \cdot \frac{p_i}{p_0} - 2\right)} \quad (5\text{-}1)$$

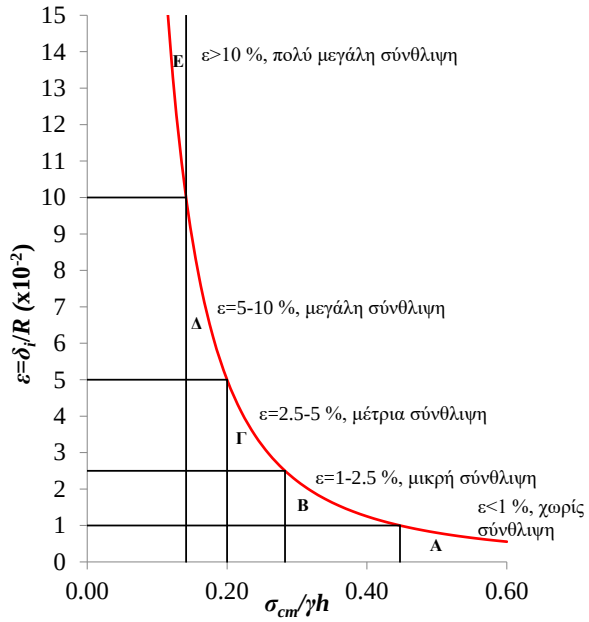
Όπου, δ_{ns} η ακτινική μετατόπιση των παρειών της σήραγγας, σ_{cm} η μονοαξονική αντοχή του πετρώματος, p_0 η πίεση του υδροστατικού φυσικού εντατικού πεδίου, και p_i η ασκούμενη πίεση από την υποστήριξη. Επίσης, η

δημιουργούμενη πλαστική ζώνη $R_{e,ns}$ $R_{e,sp}$ σε ανυποστήρικτη και υποστηριζόμενη σήραγγα αντίστοιχα, δίνονται από τις σχέσεις:

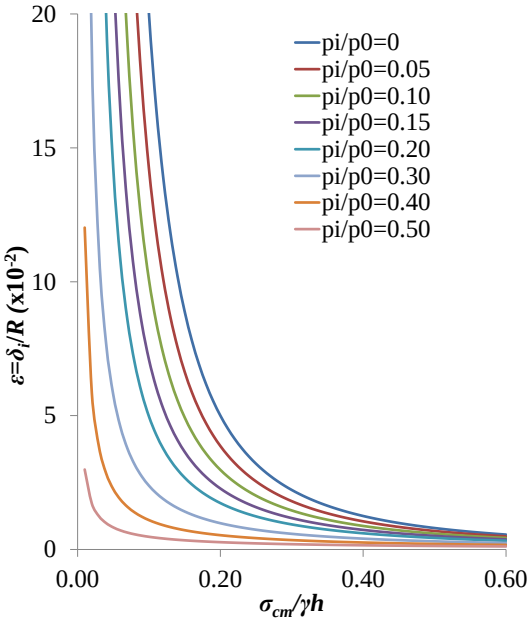
$$\frac{R_{e,ns}}{R} = 1.25 \cdot \left(\frac{\sigma_{cm}}{p_0}\right)^{(-0.57)} = 0.84 \cdot N_s^{0.57}$$

$$\frac{R_{e,sp}}{R} = \left(1.25 - 0.625 \cdot \frac{p_i}{p_0}\right) \cdot \left(\frac{\sigma_{cm}}{p_0}\right)^{\left(\frac{p_i}{p_0} - 0.57\right)} = \left(1.25 - 0.625 \cdot \frac{p_i}{p_0}\right) \cdot \left(\frac{2}{N_s}\right)^{\left(\frac{p_i}{p_0} - 0.57\right)} \quad (5\text{-}2)$$

Στο *Σχήμα 5-5*, η παραμόρφωση της σήραγγας σχετίζεται με τη σχετική αντοχή της γεωμάζας, σύμφωνα με τις παραπάνω σχέσεις. Στο αριστερό διάγραμμα παρατηρούμε, πως τα προβλήματα σύνθλιψης αυξάνουν με τη μείωση της σχετικής αντοχής (σ_{cm}/p_0) (αύξηση της υπερφόρτισης N_s) της σήραγγας, και ότι για παραπάνω από 1% παραμόρφωση η αύξησή της με τη μείωση της σχετικής αντοχής επιταχύνεται. Στο δεξιό διάγραμμα παρατηρούμε ότι εφόσον εφαρμοστούν μέτρα στήριξης, η πίεση που ασκούν μειώνει την παραμόρφωση.



(α) Κατηγορίες δριμύτητας σύνθλιψης (ανυποστήρικτη σήραγγα, Hoek & Marinos, 2000)



(β) Παραμόρφωση σήραγγας σε σχέση με την υπερφόρτιση, για διάφορες πιέσεις στήριξης (Hoek, 2010)

Σχήμα 5-5. Παραμόρφωση σήραγγας σε σχέση με την υπερφόρτιση.

Η *δριμύτητα* της σύνθλιψης ορίζεται από το μέγεθος της υπερφόρτισης ή από το μέγεθος της σύγκλισης. Ο παρακάτω *Πίνακας 5-2* παρουσιάζει τις λεκτικές περιγραφές της δριμύτητας της σύνθλιψης σε αντιστοιχία είτε με βάση την σχετική αντοχή είτε με την μετρούμενη επί τοις εκατό σύγκλιση των τοιχωμάτων της ανυποστήρικτης σήραγγας.

Πίνακας 5-2. Ποσοτικοποίηση της σύνθλιψης από διάφορους εμπειρογνώμονες και συστήματα με βάση την υπερφόρτιση ή την παραμόρφωση

1	2 Singh & Goel (1999)	3 Σύστημα Q Barton (2002)	4 Barton (2002)	5 Barla (1995)	6 Hoek & Marinos (2000)	7 Hoek & Marinos (2000)	8 Singh & Goel (1999)
Περιγραφή σύνθλιψης	$H \cdot B^{0.1} / Q_{[SRF=1]}^{0.33}$	SRF	$\gamma h/\sigma_{cm}$ ($\sigma_{cm}/\gamma h$)	$\gamma h/\sigma_{cm}$ ($\sigma_{cm}/\gamma h$)	$\gamma h/\sigma_{cm}$ ($\sigma_{cm}/\gamma h$)	δ_i/R %	δ_i/R %
Χωρίς	< 275	<5	<0.5 (>2)	< 1 (>1)	< 2.2 (>0.45)	<1	<1
Μικρή	< 450	< 10	< 2.5 (>0.4)	< 2.5 (>0.4)	< 3.5 (>0.28)	< 2.5	< 3
Μέτρια	< 630			< 5 (>0.2)	< 5.0 (>0.20)	< 5	< 5
Μεγάλη	> 630	< 20	> 2.5 (<0.4)	> 5 (<0.2)	< 7.1 (>0.14)	< 10	> 5
Πολύ μεγάλη					> 7.1 (<0.14)	> 10	

Στην 1η στήλη του πίνακα φαίνεται η επιλεγμένη λεκτική περιγραφή της σύνθλιψης Στην 2η στήλη καταγράφεται το κριτήριο σύνθλιψης του Goel (Singh & Goel, 1999), όπου B το πλάτος της σήραγγας και H το βάθος των υπερκειμένων. Στις στήλες 3 & 4, δίνονται τα όρια σύνθλιψης σύμφωνα με το σύστημα Q. Στις στήλες 5 & 6 δίνονται τα όρια σχετικής αντοχής (και το αντίστροφο της) όπως προτείνονται από τους Barla και Hoek & Marinos (2000). Στις δύο τελευταίες στήλες δίνονται τα όρια δριμύτητας της σύγκλισης με βάση την παραμόρφωση. Από τους παραπάνω πίνακες φαίνεται ότι οι ερευνητές συμφωνούν στον λεκτικό χαρακτηρισμό της σύνθλιψης σε σχέση με τις μετρούμενες συγκλίσεις (στήλες 7 και 8). Διαφορές όμως υπάρχουν ανάμεσα στους ερευνητές που προτείνουν ως μετρούμενο μέγεθος τον λόγο της επί τόπου τάσης πεδίου προς την αντοχή της βραχομάζας, όπως πχ στις στήλες 4-6.

5.3.1.2 Συμπεριφορά εδαφικών σχηματισμών

Η κατάταξη των μαλακών πετρωμάτων-εδαφών με βάση τη μηχανική τους συμπεριφορά κατά τη διάνοιξη, όπως προτάθηκε από τον Terzaghi (1950) και τροποποιήθηκε από τον Heuer (1974), φαίνεται στον πίνακα 3 του 3ου κεφαλαίου. Από τις γεωμάζες αυτές, προβλήματα ευστάθειας του μετώπου στις συνήθεις διανοίξεις, παρουσιάζουν οι συνθλιβόμενες, οι τρέχουσες-ρέουσες και οι διογκούμενες.

Τα **συνεκτικά μαλακά πετρώματα** δύνανται να παρουσιάζουν φαινόμενα σύνθλιψης. Η ευστάθεια του μετώπου σήραγγας που διανοίγεται σε αυτά εξαρτάται από την πίεση p_z των υπερκειμένων πετρωμάτων στη στάθμη του μετώπου σε βάθος z, την αστράγγιστη διατμητική αντοχή c_u του πετρώματος, και το πλάτος d της εκσκαφής. Ο ορισμός του συντελεστή αστάθειας (ή υπερφόρτισης) N_t κατακόρυφου μετώπου και η τιμή που λαμβάνει αυτός για οριακή ισορροπία, δίνονται από τους Broms & Bennermark (1967). Η οριακή τιμή του συντελεστή αστάθειας, για τιμές του σχετικού βάθους μεγαλύτερες του 2, είναι περίπου 6. Σύμφωνα με τους ερευνητές αυτούς ο συντελεστής υπερφόρτισης δεν εξαρτάται από το μέγεθος του ανοίγματος, και ως εκ τούτου η τμηματική εκσκαφή δεν φαίνεται να βοηθά στη βελτίωση της ευστάθειας του μετώπου.

Πίνακας 5-3. Κριτήριο αστάθειας σε πλάστιμες αργίλους σε βάθος μεγαλύτερο των δύο διαμέτρων

N_t	Επίπτωση στη σήραγγα		
>7	Γενικές διατμητικές αστοχίες και μετακινήσεις του εδάφους γύρω από το άνοιγμα δημιουργούν δυσκολία στον έλεγχο της ασπίδας η οποία τείνει να βυθίζεται.	Γενικά απαιτείται η χρήση ασπίδας	
6-7	Διατμητική αστοχία εμπρός από τη σήραγγα προκαλεί μετακίνηση του εδάφους προς το μέτωπο ακόμη και όταν η διάνοιξη γίνεται με ασπίδα. Η άργιλος είναι δυνατόν να εισβάλει στο κενό χώρο του ουραίου τμήματος πολύ γρήγορα ώστε να μην μπορεί να ελέγχεται	Γενικά απαιτείται η χρήση ασπίδας	Τα φορτία στην υποστήριξη της σήραγγας λόγω της σύνθλιψης θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη
5-6	Η άργιλος δύναται να συνθλιβεί στο κενό πίσω από την ασπίδα	Δύναται να απαιτείται η χρήση ασπίδας	
4-5	Ο ρυθμός σύνθλιψης είναι συνήθως επαρκώς αργός, ώστε να επιτρέπει τη διάνοιξη	χωρίς ασυνήθεις δυσκολίες	
2-4	Ο ρυθμός σύνθλιψης είναι μικρός και δεν δημιουργεί πρόβλημα στη διάνοιξη		
1	Ευσταθής διάνοιξη		

Σε **πλάστιμες (κορεσμένες) αργίλους** η ευστάθεια του μετώπου μιας σήραγγας μπορεί να εκτιμηθεί επομένως με τη βοήθεια του συντελεστή αστάθειας (Monsees., 1996). Ο Πίνακας 5-3 δίνει την αναμενόμενη συμπεριφορά (Peck, 1969) των πλάστιμων αργίλων κατά τη διάνοιξη τους, για μη αβαθείς σήραγγες. Από την παρακολούθηση πραγματικών έργων προέκυψε ότι για N_t >5 η άργιλος συνθλίβεται αρκετά γρήγορα ώστε να γεμίζει το κενό πίσω από την ασπίδα δείχνοντας ότι η χειρονακτική εξόρυξη σε τέτοιες συνθήκες είναι δύσκολη. Για N_t >6 το πέτρωμα εισβάλλει από το μέτωπο ανεξάρτητα από την εφαρμογή συνήθων μεθόδων στήριξης του. Για N_t > 7 είναι εξαιρετικά δύσκολος αν όχι αδύνατος ο έλεγχος της ασπίδας. Και στις τρεις προηγούμενες περιπτώσεις το αποτέλεσμα της μετακίνησης θα φανεί στην επιφάνεια. Για N_t < 5 δεν αναμένεται ασυνήθης δυσκολία κατά τη διάνοιξη. Για N_t < 4 το πέτρωμα συμπεριφέρεται από χαλαρούμενο έως σταθερό και δε συνθλίβεται. Βέβαια, η αντοχή του πετρώματος είναι συνάρτηση του χρόνου λόγω των τοπικών αστοχιών που οφείλονται στη συγκέντρωση τάσεων γύρω από ρωγμές και στη διάχυση της αρνητικής πίεσης των πόρων.

Σε δύσκολες περιπτώσεις όπου το πέτρωμα δεν μπορεί να σταθεροποιηθεί με τις συνήθεις μεθόδους υποστήριξης, επιχειρείται βελτίωση των συνθηκών φόρτισής του είτε με αύξηση της αντοχής του είτε με μείωση της δρώσας πίεσης p_z-p_a. Και οι δύο τακτικές έχουν σαν αποτέλεσμα τη μείωση του συντελεστή αστάθειας. Η αύξηση της αντοχής επιτυγχάνεται με μεθόδους όπως οι ενέσεις σταθεροποίησης και η ψύξη. Η μείωση της δρώσας πίεσης επιτυγχάνεται με την αύξηση της πίεσης του αέρα μέσα στη σήραγγα.

Οι **υπερστερρεοποιημένες άργιλοι** παρουσιάζουν ένα είδος αστάθειας γνωστό σαν διόγκωση. Η κατασκευή μίας σήραγγας μέσα από τέτοια υλικά έχει σαν αποτέλεσμα την αποτόνωση της παράπλευρης πίεσης (εγκιβωτισμού) στα όρια της εκσκαφής. Σε κορεσμένες αργίλους η διαφορά της πίεσης θα δημιουργήσει εισροή νερού στην άργιλο. Ανάλογα με το βαθμό υπερστερρεοποίησης η διόγκωση μπορεί να συνεχισθεί μέχρις ότου το άνοιγμα κλείσει τελείως. Ο αποτελεσματικότερος τρόπος αντιμετώπισης αυτών των υλικών είναι η κατασκευή μίας επένδυσης κυκλικής διατομής όσο το δυνατό γρηγορότερα μετά την εκσκαφή. Η επένδυση θα πρέπει να μπορεί να αναλαμβάνει φορτία σημαντικά μεγαλύτερα από την πίεση των υπερκειμένων.

Οι **ευαίσθητες άργιλοι** έχουν μονοαξονική αντοχή μετά την αναμόχλευση τους λιγότερη από το ένα τέταρτο της αδιατάρακτης. Η διαδικασία της εκσκαφής μιας σήραγγας αναμοχλεύει σημαντικά το έδαφος με αποτέλεσμα την ροή της αργίλου και το γέμισμα του κενού πίσω από την ασπίδα, εφόσον χρησιμοποιείται αυτή. Μετά τη στράγγιση του νερού των πόρων αυτές οι άργιλοι επανακτούν την αντοχή τους. Επιφανειακή καθίζηση αναμένεται σαν αποτέλεσμα τόσον της μετακίνησης της αργίλου, όσον και της αλλαγής του όγκου της λόγω της στράγγισης του νερού των πόρων του αναμοχλευμένου υλικού.

Τα **κοκκώδη εδάφη** (μη συνεκτικά) διαφέρουν από τα συνεκτικά στην μεγάλη επίδραση του νερού στις ιδιότητες τους. Η άμμος με κάποια ποσότητα συνδετικής αργίλου μπορεί να έχει εξαίρετο χρόνο σταθερής συμπεριφοράς, ενώ κάτω από το νερό δύναται να ταξινομηθεί σαν χρήγορα χαλαρούμενο. Γενικά η ευστάθεια κοκκωδών εδαφών δύναται να είναι επαρκής για τη διάνοιξη τους εφόσον εμπεριέχουν μικρή ποσότητα αργίλου ως συνδετικού ή όταν το έδαφος είναι ύφυγρο και η αναπτυσσόμενη αρνητική πίεση του νερού των πόρων στην επιφάνεια της εκσκαφής δεν διαχέεται πολύ γρήγορα. Συμπυκνωμένα αδιαβάθμητα εδάφη με γωνιώδεις κόκκους είναι τα πιο σταθερά, ενώ τα διαβαθμισμένα ή οι θύνες με στρογγυλεμένους κόκκους είναι τα λιγότερο σταθερά. Κάτω από την επιφάνεια του νερού τα εδάφη αυτά είναι ασταθή και εκτός της υποστήριξης απαιτούν και τον έλεγχο του εδαφικού νερού για τη σταθεροποίηση τους. Η σταθερότητα τους μπορεί να βελτιωθεί σα συνέπεια της σύνδεσης τους από χημικές ουσίες που προέρχονται από την αποσάθρωση υπερκειμένων πετρωμάτων και τη μεταφορά τους από διηθούμενα νερά.

Οι **λιθομιγείς άργιλοι**, οι σχετιζόμενες με την υποχώρηση των παγετώνων περιέχουν ογκολίθους μέσα σε πτωχά διαβαθμισμένα εδάφη. Η δυσκολία κατά τη διάνοιξη της σήραγγας έγκειται στην μετάθεση αυτών των ογκολίθων. Στις αστικές περιοχές είναι επίσης δυνατό να συναντηθούν και άλλα εμπόδια, όπως **πάσσαλοι** εγκαταλειμμένων βαθιών θεμελιώσεων. Εφόσον οι τελευταίοι είναι από ξύλο τότε αυτοί μπορούν εύκολα να αποκοπούν. Εγκαταλειμμένα **μεταλλεία και πηγάδια**, τα οποία συχνά δεν είναι καταγραμμένα, δημιουργούν επίσης ιδιαίτερα σημαντικές δυσκολίες κατά τη διάνοιξη.

5.3.1.3 Απαιτήσεις διάνοιξης

Η επιλεγμένη μέθοδος διάνοιξης της σήραγγας, ο βαθμός δυσκολίας και το επακόλουθο κόστος καθορίζονται πρωταρχικά από τον χρόνο ευστάθειας του εδαφικού υλικού. Αυτός, εκτός από το υφιστάμενο εντατικό, πεδίο, εξαρτάται κυρίως από την ποιότητα του πετρώματος και το μέγεθος του υπόγειου ανοίγματος. Η βελτίωση της ποιότητας της γεωμάζας δύναται συνήθως να επιτευχθεί εφόσον τούτο απαιτείται, το κόστος της όμως είναι μεγάλο και αποτελεί συνήθως την έσχατη λύση. Αντίθετα, η τμηματική εξόρυξη της διατομής, σε αντίθεση με την ολομέτωπη, αποτελεί συνήθη πρακτική, που με το διαχωρισμό της διατομής σε πολλαπλά μέτωπα, μειώνεται το ενεργό μέγεθος του ανοίγματος, και επιτυγχάνεται βελτίωση των συνθηκών ευστάθειας.

Η επιλογή της τεχνικής κατασκευής μιας σήραγγας δεν απορρέει μόνο από κριτήρια τεχνικό-γεωλογικά ή της μηχανικής των πετρωμάτων, αλλά και από οικονομικά και τεχνογνωσίας της συγκεκριμένης χώρας. Έτσι είναι δυνατόν κατά τη φάση των προσφορών αλλά και κατά την κατασκευή μίας σήραγγας να έχουν μελετηθεί από τους συμμετέχοντες στη προσφορά πολλές εναλλακτικές μέθοδοι. Η διαδικασία της κατασκευής που προτείνεται θα πρέπει να προδιαγράφεται λεπτομερώς.

Εφόσον η ευστάθεια έμπροσθεν του μετώπου μέχρι το επόμενο βήμα εκσκαφής είναι εξασφαλισμένη, τότε η διαδικασία της διάνοιξης περιορίζεται στον έλεγχο της επάρκειας των τοιχωμάτων της σήραγγας. Η ανυποστήρικτη περιοχή πλησίον του μετώπου θεωρείται ότι στηρίζεται μέχρι της τοποθέτησης της επένδυσης μπροστά μεν στο πέτρωμα του μετώπου της σήραγγας, πίσω δε στην ήδη τοποθετημένη επένδυση. Η παρακολούθηση με μετρήσεις περιορίζεται στη συμπεριφορά της σήραγγας και των πετρωμάτων γύρω από αυτήν. Επειδή η ευστάθεια της σήραγγας και ειδικότερα του μετώπου εξαρτώνται από το μέγεθος της σήραγγας, η εξασφάλιση του μετώπου επιτυγχάνεται είτε με τη μείωση της διατομής του σε επί μέρους εκσκαπτόμενα τμήματα, για καθένα από τα οποία το μέτωπο είναι ευσταθές χωρίς την απαίτηση πρόσθετων μέτρων, είτε με τη χρήση πρόσθετων μέτρων προϋποστήριξης έμπροσθεν του μετώπου.

5.3.1.4 Επιλογή της μεθόδου διάνοιξης με βάση το δυναμικό υπερφόρτισης

Με βάση επιτόπιες παρατηρήσεις και μετρήσεις, ο Sakurai (1983) πρότεινε ότι παραμόρφωση της σήραγγας πάνω από ~1% σχετίζεται με την έναρξη αστάθειας και δυσκολίας όσον αφορά την παροχή επαρκούς στήριξης. Παρατηρήσεις πεδίου από τους Chern et al (1998) επιβεβαιώνουν την πρόταση του Sakurai. Η αύξηση της πίεσης της υποστήριξης μειώνει την παραμόρφωση της σήραγγας. Ας σημειωθεί ότι ορισμένες σήραγγες που υπέστησαν παραμορφώσεις υψηλές έως και 5% δεν παρουσίασαν προβλήματα σταθερότητας, όμως τα κατασκευαστικά προβλήματα αυξήθηκαν σημαντικά με την αύξηση της παραμόρφωσης. Ως εκ τούτου, το όριο του ~1% που πρότεινε Sakurai είναι μόνο μια ένδειξη της αυξανόμενης δυσκολίας και δεν θα πρέπει να θεωρείται ότι επαρκής είναι μόνο η στήριξη που περιορίζει τις παραμορφώσεις της σήραγγας στο ~1%. Στην πραγματικότητα, σε ορισμένες περιπτώσεις, είναι σκόπιμο να επιτραπεί στη σήραγγα να παραμορφωθεί έως και 5% πριν από την ενεργοποίηση της υποστήριξης. Στους παρακάτω τρεις πίνακες δίνονται οδηγίες με βάση την αναμενόμενη συμπεριφορά της σήραγγας.

Πίνακας 5-4. Μέθοδος εκσκαφής, υποστήριξη και προφυλάξεις που πρέπει να ληφθούν για διάφορες συνθήκες βραχομάζας (απόσπασμα από Singh – Goel, 1999).

Α/Α	*Κατηγορία*	*Μέθοδος εκσκαφής*	*Τύπος υποστήριξης*	*Προφυλάξεις*
1	Σταθερό - αυτό-υποστηριζόμενο	TBM ή Ολομέτωπη με ελεγχόμενες ανατινάξεις.	Χωρίς υποστήριξη, ή σποραδική ήλωση και λεπτό στρώμα εκτοξευόμενου σκυροδέματος ώστε να μην μεγαλώσουν οι διακλάσεις	Προσοχή για τοπικές σφήνες ή ζώνες διάτμησης. Αν οι γεωλογικές συνθήκες αλλάζουν συχνά η χρήση TBM δεν συνιστάται.
2	Μη σταθερό – χωρίς προβλήματα σύνθλιψης	Ολομέτωπη με ελεγχόμενες ανατινάξεις από διατρητικά φορεία.	Εύκαμπτη. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και προεντεταμένοι κοχλίες ικανής αντοχής. Η χρήση ινών στο σκυρόδεμα μπορεί να απαιτείται.	Η πρώτη στρώση σκυροδέματος εναποτίθεται με καθυστέρηση για να εκτονωθεί η ελαστική ενέργεια του πετρώματος, όχι όμως αργότερα από τον ελάχιστο χρόνο αυτοϋποστήριξης.
3	Χαλαρούμενο	Με αναβαθμό, διάτρηση και ανατινάξεις.	Χαλύβδινα πλαίσια, προεντεταμένα αγκύρια και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με ίνες (SFRS).	Αναμένονται ισχυρά φορτία, ακόμη και πλευρικά.
4	Συνθλιβόμενο Μικρή σύνθλιψη (δ_i/R = 1-3%)	Με αναβαθμό, διάτρηση και ανατινάξεις.	Ηλοι πλήρους συνάφειας και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με ίνες (SFR). Κατασκευή ανάστροφου τόξου στο δάπεδο για την δημιουργία κλειστού δακτυλίου υποστήριξης.	Εγκατάσταση υποστήριξης μετά από κάθε ανατίναξη. Η κυκλική διατομή είναι καλύτερη. Αναμένονται πλευρικές πιέσεις. Το μέτωπο να μην απομακρύνεται επειδή καθυστερεί την δημιουργία κλειστού δακτυλίου υποστήριξης.
	Μέτρια σύνθλιψη (δ_i/R = 3-5%)	Διάνοιξη με αναβαθμό, διάτρηση και ανατινάξεις.	Εύκαμπτη υποστήριξη με ισχυρούς όλκιμους ήλους πλήρους συνάφειας και SFRS. Ανάστροφο τόξο στο δάπεδο με ήλους για την αποφυγή ανύψωσης και τη δημιουργία κλειστού δακτυλίου υποστήριξης. Αν τοποθετηθούν σιδηρά πλαίσια αυτά εγκιβωτίζονται στο σκυρόδεμα.	Εγκατάσταση υποστήριξης μετά από κάθε έκρηξη. Αύξηση του πλάτους της σήραγγας για να απορροφήσει τις συγκλίσεις. Η κυκλική διατομή είναι καλύτερη. Αναμένονται πλευρικές πιέσεις. Απαραίτητα τα όργανα μέτρησης.
	Μεγάλη σύνθλιψη (δ_i/R > 5%)	Διάνοιξη με αναβαθμό, σε μικρές σήραγγες, με πολλαπλά μέτωπα σε μεγαλύτερες. Με δοκούς προπορείας αν ο χρόνος αυτοϋποστήριξης είναι μικρός	Πολύ εύκαμπτη υποστήριξη με ισχυρούς όλκιμους ήλους πλήρους συνάφειας και SFRS υποχώρησης. Αν το σκυρόδεμα αστοχεί, τοποθετούνται σιδηρά πλαίσια. Κατασκευή ανάστροφου τόξου στο δάπεδο για την δημιουργία κλειστού δακτυλίου υποστήριξης. Εγκιβωτισμός των πλαισίων στο σκυρόδεμα. Ήλωση του δαπέδου για να μην ανυψωθεί. Μερικές φορές χρησιμοποιούνται σιδηρά πλαίσια με χαλαρή γέμιση ώστε να επιτραπούν κάποιες κινήσεις εκτόνωσης των τάσεων, μέχρι 4% σύγκλιση των παρειών.	Αύξηση του πλάτους της σήραγγας για να απορροφήσει τις συγκλίσεις. Εγκατάσταση του ανάστροφου τόξου το συντομότερο για να ενεργοποιηθεί η πλήρης αντοχή της υποστήριξης. Απαραίτητα τα όργανα για την συνεχή παρακολούθηση των συγκλίσεων. Η κυκλική διατομή είναι καλύτερη.

Ο Πίνακας 5-4 των Singh and Goel (1999) δίνει οδηγίες για τη διάνοιξη σήραγγας, και τις προφυλάξεις που θα πρέπει να ληφθούν, για όλο το εύρος αναμενόμενων συμπεριφορών. Οι πρώτες δύο κατηγορίες ανήκουν στα μη παραμορφώσιμα πετρώματα, και η διάνοιξή τους επιτυγχάνεται με χρήση ηλώσεων και εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Η τρίτη κατηγορία ανήκει στις μη συνθλίβουσες λίγο παραμορφώσιμες γεωμάζες, που απαιτούν και τη στήριξη με χαλύβδινα πλαίσια. Χαρακτηριστικό των τριών πρώτων κατηγοριών είναι η μη απαίτηση κλεισίματος του δακτυλίου με την κατασκευή επένδυσης ανάστροφου τόξου. Αντίθετα, οι συνθλίβουσες γεωμάζες της 4ης κατηγορίας απαιτούν το κλείσιμο του δακτυλίου, και τα μέτρα γίνονται βαρύτερα με την αύξηση της υπερφόρτισης. Οι οδηγίες αυτές δεν λαμβάνουν υπόψη τη συμπεριφορά του μετώπου, αν εξαιρεθεί η περίπτωση της μεγάλης σύνθλιψης, για την οποία προτείνεται η δυνατότητα χρήσης δοκών προπορείας. Εν τούτοις, το μέτωπο είναι αυτό που στηρίζει τη σήραγγα στο ανυποστήρικτο τμήμα του και η ευστάθειά του δεν μπορεί να μη λαμβάνεται υπόψη, όταν αυτό αδυνατεί να φέρει τα φορτία που του αναλογούν.

Μέθοδοι για την αντιμετώπιση της σταθερότητας του μετώπου σε συνθλίβουσα γεωμάζα έχουν αναπτυχθεί κυρίως στην Ευρώπη για διανοίξεις μέσα στις Άλπεις. Αυτές οι μέθοδοι μπορεί να χωριστούν σε τρεις διακριτές κατηγορίες. Μία από αυτές περιλαμβάνει επιμέρους διανοίξεις μικρού μεγέθους προπορευόμενες από τα άλλα τμήματα του μετώπου. Αυτή η μέθοδος, η οποία τείνει να προτιμάται βόρεια των Άλπεων, βασίζεται στο γεγονός ότι η διαδοχική διαδικασία κατασκευής καταλήγει στη δημιουργία ενός πολύ ισχυρού κελύφους από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Με τις εναλλακτικές προσεγγίσεις, που συνήθως προτιμούνται νότια των Άλπεων, μια σήραγγα διανοίγεται είτε ολομέτωπα είτε σε δύο στάδια, και το μέτωπο ενισχύεται και προϋποστηρίζεται. Ο Πίνακας 5-5 δίνει περιληπτικά επιλογές για τον έλεγχο της ευστάθειας του μετώπου και την επακόλουθη εγκατάσταση της υποστήριξης της σήραγγας.

Όλες οι προσεγγίσεις που απεικονίζονται στο σχήμα έχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και δεν υπάρχουν απλοί κανόνες για τη λήψη απόφασης ποια μέθοδος είναι καλύτερη για ένα συγκεκριμένο σύνολο περιστάσεων. Για σχετικά ήπιες συνθήκες σύνθλιψης, ηλώσεις και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα χρησιμοποιούνται ως κύρια στοιχεία υποστήριξης από όλα αυτά τα συστήματα. Στην περίπτωση της μεθόδου πολλαπλών επιμέρους μετώπων, ο αριθμός τους αυξάνει με τη δριμύτητα της σύνθλιψης. Αυτό εξασφαλίζει ότι το εξωτερικό κέλυφος από οπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα δεν καταπονείται υπερβολικά σε οποιοδήποτε στάδιο της διαδικασίας εκσκαφής. Η σταθερότητα των επιμέρους μικρότερων μετώπων είναι επίσης ευκολότερο να ελεγχθεί.

Για τις επιλογές άνω ημιδιατομής και βαθμίδας, και της ολομέτωπης εκσκαφής, όσο αυξάνεται η δριμύτητα της σύνθλιψης προστίθενται βαρύτερα και σε πιο πυκνή διάταξη χαλύβδινα πλαίσια. Για πολύ δριμεία σύνθλιψη, προστίθενται ενεματωμένα αγκύρια από υαλοΐνες για την ενίσχυση του μετώπου και δοκοί προπορείας ή παρόμοια στοιχεία για την προ-υποστήριξη της γεωμάζας μπροστά από το προχωρούν μέτωπο.

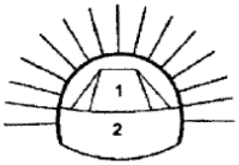
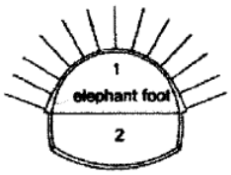
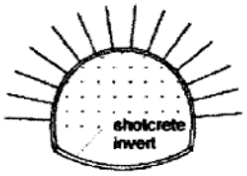
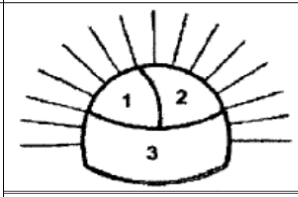
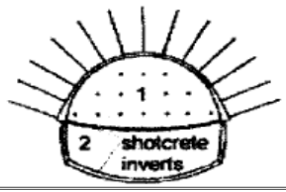
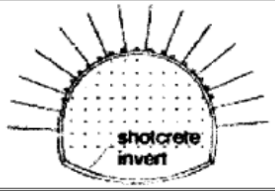
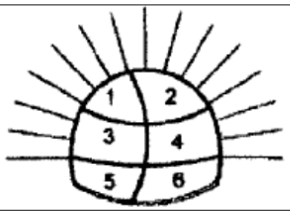
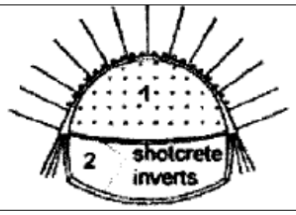
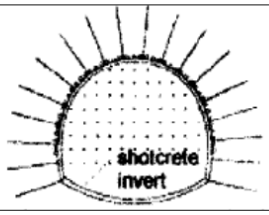
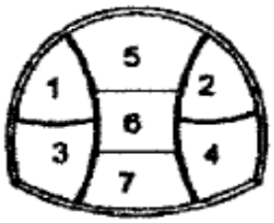
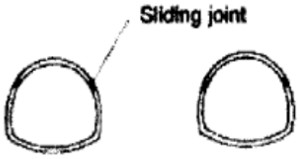
Και ενώ αυτή η προ-ενίσχυση είναι πολύ αποτελεσματική για την προστασία του πυρήνα γεωμάζας μπροστά από το μέτωπο, δημιουργεί απαίτηση εφόσον εκτίθεται μέσα στη σήραγγα. Τα εκτεθειμένα άκρα των δοκών προπορείας πρέπει να υποστηρίζονται από χαλύβδινα πλαίσια τοποθετημένα όσο το δυνατόν πιο κοντά στο μέτωπο. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να εμποδίζεται η αστοχία των βάσεων θεμελίωσης των χαλύβδινων πλαισίων με τη διαμόρφωση κάποιας μορφής πέδιλου ή την παροχή συστήματος αγκύρωσης. Ένα συχνό σφάλμα σχεδιασμού είναι η χρήση υπερβολικά μακρών δοκών προπορείας που, ενώ παρέχουν καλή υποστήριξη για τη γεωμάζα μπροστά από το μέτωπο, έχουν την τάση να υπερφορτώνουν το χαλύβδινα πλαίσια πίσω από το μέτωπο.

Τελικά φτάνουμε σε ένα σημείο όπου είναι δύσκολο να δοθεί υποστήριξη επαρκούς ικανότητας, ιδιαίτερα αν η εξαιρετικά δριμεία σύνθλιψη συνδέεται με πολύ πτωχή ποιότητα γεωμάζας στην οποία οι ηλώσεις είναι αναποτελεσματικές. Σε τέτοιες περιπτώσεις μπορεί να είναι αναγκαίο να επιτραπεί στην υποστήριξη να υποχωρήσει με ελεγχόμενο τρόπο, ώστε η ικανότητά της να ενεργοποιηθεί μετά από σημαντική μετατόπιση, με αποτέλεσμα τη μείωση της πίεσης υποστήριξης που απαιτείται για τη σταθεροποίηση της σήραγγας και του μετώπου. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται είτε συρόμενες αρθρώσεις στα χαλύβδινα πλαίσια είτε στοιχεία που είναι σχεδιασμένα για να παραμορφώνονται πλαστικά με ελεγχόμενο τρόπο.

Όταν μια μεγάλη σήραγγα είναι υποχρεωμένη να εξυπηρετεί υψηλή υδραυλική παροχή ή συγκοινωνιακό σύστημα δύο λωρίδων, η σήραγγα μπορεί να χωριστεί σε δύο μικρότερες, οι οποίες είναι γενικά πιο εύκολο να υποστηριχτούν. Αυτή η μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για τη διέλευση ευρειών ζωνών ρηγμάτων.

Πίνακας 5-5. Υποδείξεις επιλογής μέτρων υποστήριξης σε διάφορες συνθήκες σύνθλιψης (Hoek 2001). Αριστερά, διάνοιξη με πολλαπλά μέτωπα, έχει στοιχεία της SCL. Στο μέσον, διάνοιξη σε δύο φάσεις, έχει στοιχεία της NATM. Δεξιά, ολομέτωπη διάνοιξη, έχει στοιχεία εφαρμογής της ADECO-RS.

Διάγραμμα σχεδιασμού υπόγειων ανοιγμάτων με προβλήματα σύνθλιψης.

	Μέθοδος διάνοιξης ⇨ / Μελέτη ⇩	Πολλαπλές διανοίξεις (Αυστριακή μέθοδος NATM ή SCL)*	Διάνοιξη με αναβαθμό (Βελγική μέθοδος)*	Ολομέτωπη διάνοιξη (Ιταλική μέθοδος)*
Μικρή σύνθλιψη	Χρησιμοποιείται συνήθως η μέθοδος σύγκλισης - αποτόνωσης για την πρόβλεψη του σχηματισμού μιας πλαστικής ζώνης γύρω από την εκσκαφή και για την αλληλεπίδραση μεταξύ της προοδευτικής ανάπτυξης αυτής της ζώνης και των διάφορων τύπων υποστήριξης.	 Κοχλίωση, 100 mm εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και υποστήριξη του μετώπου με πυρήνα αντιστήριξης	 Κοχλίωση, σιδηρά πλαίσια με διεύρυνση στον πόδα Α' φάσης και κλείσιμο του δαπέδου	 Κοχλίωση, δικτυωτά πλαίσια στο σκυρόδεμα, κλείσιμο του δαπέδου αγκύρια fiberglass για προστασία του μετώπου
Μεγάλη σύνθλιψη	Χρησιμοποιούνται συνήθως μέθοδοι πεπερασμένων στοιχείων 2 διαστάσεων (πχ. Phase2) ενσωματώνοντας τα στοιχεία υποστήριξης και την διαδοχή των φάσεων εκσκαφής. Η αστάθεια στο μέτωπο δεν είναι ένα ιδιαίτερο πρόβλημα	 Μερική διάνοιξη του μετώπου. Κοχλίωση, 150 mm εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και ανάστροφο δάπεδο	 Κοχλίωση, σιδηρά πλαίσια με διεύρυνση στον πόδα Α' φάσης, κλείσιμο του δαπέδου, αγκύρια fiberglass για προστασία του μετώπου	 Δοκοί προπορείας, κοχλίωση, σιδηρά πλαίσια μέσα στο σκυρόδεμα, κλείσιμο του δαπέδου αγκύρια fiberglass για προστασία του μετώπου
Πολύ μεγάλη σύνθλιψη	Ο σχεδιασμός της σήραγγας ελέγχεται από την αστάθεια του μετώπου. Αν και γενικώς χρησιμοποιείται διδιάστατη ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, απαιτείται κάποια εκτίμηση της δράσης των δοκών προπορείας και της ενίσχυσης του μετώπου.	 Κοχλίωση, 200 mm εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, αγκύρια self drilling	 Κοχλίωση, σιδηρά πλαίσια με μικροπασάλους θεμελίωσης , κλείσιμο των δαπέδων, αγκύρια fiberglass για προστασία του μετώπου	 Πυκνές δοκοί προπορείας, ή jet grouting, κοχλίωση, σιδηρά πλαίσια μέσα στο σκυρόδεμα, κλείσιμο του δαπέδου, αγκύρια fiberglass για προστασία του μετώπου
Ακραία σύνθλιψη	Σοβαρά προβλήματα στην ευστάθεια του μετώπου και μεγάλες συγκλίσεις στην σήραγγα δημιουργούν ένα ιδιαίτερα δύσκολο πρόβλημα τριών διαστάσεων για το οποίο δεν διατίθεται ακόμη αποτελεσματική μέθοδος σχεδιασμού. Τις περισσότερες φορές οι λύσεις βασίζονται στην εμπειρία.	 Κεντρικός στύλος, 250 mm εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, lattice girders μέσα στο σκυρόδεμα, χωρίς αγκύρια.	 Ομπρέλα δοκών προπορείας, σιδηρά πλαίσια με ολισθαίνοντες αρμούς, κλειστά προσωρινά και μόνιμα ανάστροφα δάπεδα.	 Χωρισμός σε δύο παράλληλες σήραγγες, πλαίσια με ολισθαίνοντες αρμούς, 250 mm εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

* Δική μας συμπλήρωση

Πίνακας 5-6. Κατηγορίες μέτρων υποστήριξης για συνθλίβοντα πετρώματα (ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ ΑΕ, 2003)

Περιοχές παραμορφώσεων χωρίς μέτρα υποστήριξης (% μείωση διατομής σήραγγας / διάμετρος εκσκαφής) ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ	**Γεωμηχανικές συνθήκες**	**ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΑ ΜΕΤΡΑ ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΑΝΑ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ**
0,001 – 0,01 Α	Πολύ απλές συνθήκες εκσκαφής. Η αντοχή της βραχομάζας είναι μεγαλύτερη από τις εφαπτομενικές τάσεις. Τα μέτρα υποστήριξης έχουν στόχο την αντιμετώπιση δομικού τύπου αστοχιών.	Αγκυρώσεις σε συνδυασμό με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Προδιαγραφή και τεκμηρίωση μέτρων προστασίας στο μέτωπο (εάν απαιτείται)
0,01 – 0,1 Β	Οπως παραπάνω. Ασυνέχειες με δυσμενή προσανατολισμό, σε συνδιασμό με την χρήση εκρηκτικών για την εκσκαφή και τις εφαπτομενικές τάσεις οδηγούν σε δομικού τύπου αστάθειες.	Αγκυρώσεις σε συνδυασμό με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα Προδιαγραφή και τεκμηρίωση μέτρων προστασίας στο μέτωπο (εάν απαιτείται).
0,1 – 1 Γ	Οι εφαπτομενικές τάσεις δεν ξεπερνούν την αντοχή της βραχομάζας. Ωστόσο, καταπτώσεις τεμαχών βράχου, μπορούν να παρατηρηθούν κατά μήκος ασυνεχειών με δυσμενή προσανατολισμό και σε συνδυασμό με την χρήση εκρηκτικών	Αγκυρώσεις σε συνδυασμό με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα Χρήση μεταλλικών/δικτυωτών υποστηριγμάτων. Προδιαγραφή και τεκμηρίωση μέτρων προστασίας στο μέτωπο (εάν απαιτείται).
1 – 2,5 Δ	Συνθήκες ελαφράς σύνθλιψης (squeezing). Οι εφαπτομενικές τάσεις είναι μεγαλύτερες από την αντοχή της βραχομάζας.	Αγκυρώσεις σε συνδυασμό με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα Χρήση μεταλλικών/ δικτυωτών υποστηριγμάτων Προενίσχυση μετώπου.
2,5 – 5 Ε	Συνθήκες ισχυρής σύνθλιψης (squeezing) η οποία μπορεί ελέγχεται από τον προσανατολισμό των ασυνεχειών. Πιθανά φαινόμενα αστάθειας στο μέτωπο.	Αγκυρώσεις σε συνδυασμό με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Χρήση μεταλλικών/ δικτυωτών υποστηριγμάτων Προενίσχυση μετώπου.
5 – 10 Ζ	Συνθήκες πολύ ισχυρής σύνθλιψης (squeezing). Οι ασυνέχειες δεν παίζουν καθοριστικό ρόλο. Αναμένονται φαινόμενα αστάθειας στο μέτωπο.	Αγκυρώσεις, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, πλαίσια. Βελτίωση ιδιοτήτων τμήματος της σήραγγας προ της εκσκαφής με αγκυρώσεις ή /και χρήση δοκών προπορείας. Εκσκαφή σε μικρότερα ανοίγματα. Πιθανή χρήση στοιχείων ελέγχου παραμορφώσεων.
>10 Η	Εξαιρετικά ισχυρή σύνθλιψη.	Όπως παραπάνω.
Θ	Ρέοντα εδάφη	Ειδικές τεχνικές σταθεροποίησης, χημικά ενέματα, ψύξη κ.λ.π.

Σε πολύ πτωχή γεωμάζα είναι δύσκολο να κρατηθούν τα διατρήματα ανοικτά και μπορεί να είναι απαραίτητη η χρήση διατρητικών και όχι συμβατικών ήλων. Αυτοί είναι ήλοι εφοδιασμένοι με αναλώσιμες

κεφαλές διάτρησης που απομένουν στη θέση τους στο βάθος της οπής. Σε εξαιρετικά πτωχή ποιότητα της γεωμάζας, ιδίως όταν περιέχει αργιλικά ορυκτά, οι διατρητικοί ήλοι μπορεί να είναι αναποτελεσματικοί λόγω της αστοχίας του δεσμού μεταξύ του ενέματος και της περιβάλλουσας γεωμάζας.

Οι μέθοδοι πολλαπλών επιμέρους στοών τείνουν να είναι πιο ασφαλείς από τις ολομέτωπες, αλλά έχουν μεγάλες απαιτήσεις για προσεκτικό σχεδιασμό των λεπτομερειών του συστήματος υποστήριξης και για την ποιότητα της εργασίας υλοποίησης του σχεδιασμού. Η ολομέτωπη μέθοδος φέρει μια σχετικά υψηλή διακινδύνευση, καθόσον αστοχία σε οποιοδήποτε μέρος του συστήματος στήριξης μπορεί να οδηγήσει σε κατάρρευση ενός μεγάλου όγκου της γεωμάζας. Από την άλλη πλευρά, όταν εφαρμόζεται σωστά, η μέθοδος μπορεί να είναι πολύ αποτελεσματική.

Η τελική επιλογή της μεθόδου που θα χρησιμοποιηθεί για μια συγκεκριμένη κατάσταση εξαρτάται από τη σύνθετη διάδραση πολλών παραγόντων. Εκτός από την ασφάλεια, το κόστος και τις εκτιμήσεις για το χρονοδιάγραμμα, οι παράγοντες αυτοί περιλαμβάνουν, επίσης, τη σχετική πείρα του ανάδοχου, του μελετητή και των συμβούλων που ασχολούνται με το έργο. Η επιτυχής εφαρμογή των μεθόδων εξαρτάται περισσότερο από την κρίση βασισμένη στην εμπειρία από ό, τι σε θεωρητικούς υπολογισμούς. Ειδικότερα, η εμπειρία και οι αρμοδιότητες του ατόμου που κατευθύνει το έργο στο μέτωπο είναι ζωτικής σημασίας, δεδομένου ότι σπάνια υπάρχει χρόνος για μακρές ακαδημαϊκές συζητήσεις όταν αντιμετωπίζονται προβλήματα αστάθειας του μετώπου της σήραγγας. Το άτομο αυτό θα πρέπει να είναι μηχανικός, δεδομένου ότι δεν είναι μόνο η εμπειρία αλλά και μια κατανόηση των μηχανισμών αλληλεπίδρασης γεωμάζας-υποστήριξης που θα υπαγορεύσει την επιλογή της πλέον ενδεδειγμένης πορείας δράσης.

Ο Πίνακας 5-6 δίνει οδηγίες διάνοιξης επίσης με βάση την υπερφόρτιση του πετρώματος, που αφορούν ένα μεγάλο εύρος συνθηκών διάνοιξης που απαντώνται στις σήραγγες που διέρχονται από πληθώρα γεωλογικών ζωνών του Ελλαδικού χώρου.

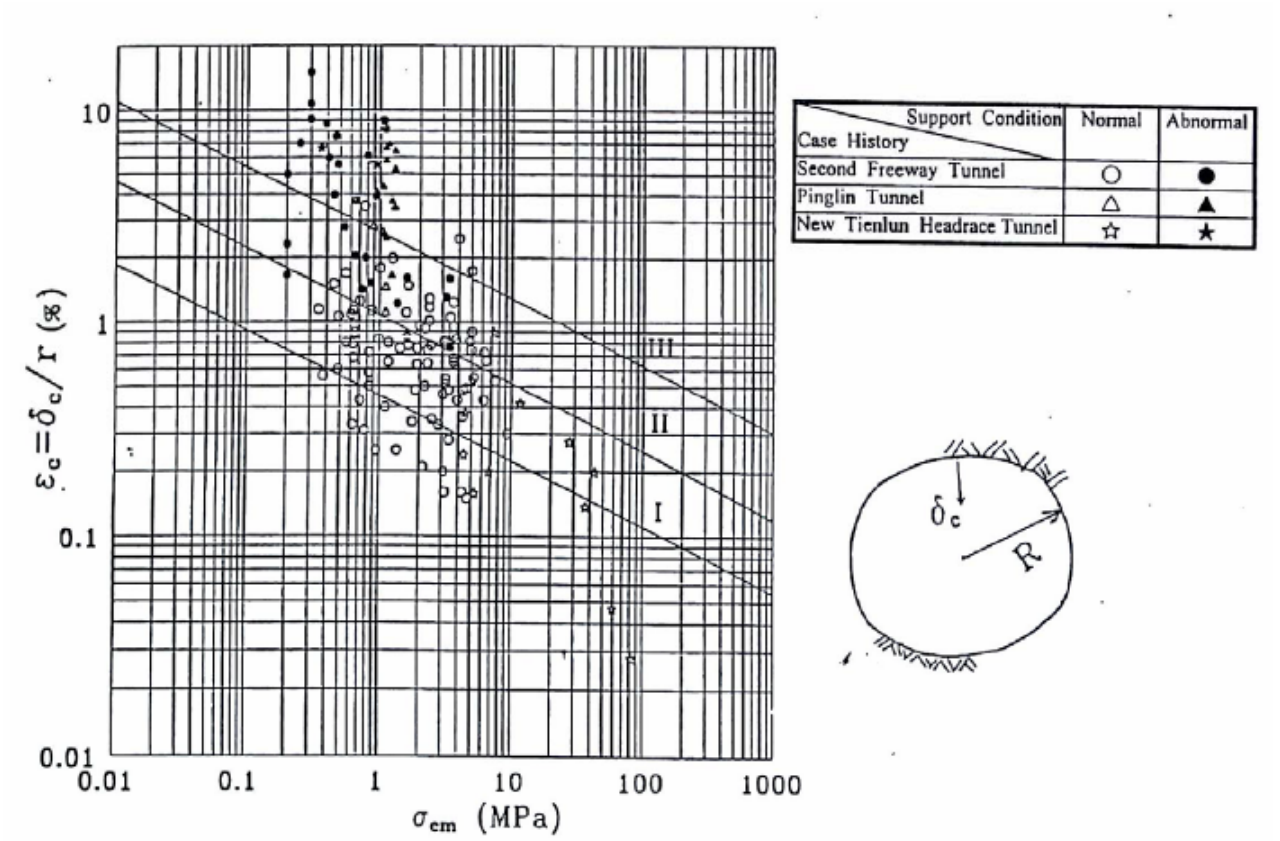
Η οριστική επιβεβαίωση της ευστάθειας της διάνοιξης επιτυγχάνεται με αριθμητικές αναλύσεις που λαμβάνουν υπόψη τους τόσον την ακριβή γεωμετρία της διάνοιξης στις διάφορες φάσεις, όσον και τις ακριβείς παραμέτρους των υλικών της γεωμάζας και της υποστήριξης.

5.3.1.5 Κατηγορίες επικινδυνότητας για σήραγγες σε διάφορες γεωμάζες

Η δριμύτητα της σύνθλιψης λαμβάνει υπόψη το δυναμικό υπερφόρτισης χωρίς να λαμβάνει υπόψη της τον τύπο της γεωμάζας. Έτσι, η ίδια παραμόρφωση για μια σκληρή βραχομάζα θεωρητικά έχει την ίδια επικινδυνότητα με μια μαλακή. Θέλοντας να λάβει υπόψη του και αυτόν τον παράγοντα ο Sakurai (1997), τροποποίησε το γενικό κανόνα του ορίου παραμόρφωσης 1% για την έναρξη των προβλημάτων διάνοιξης σε σήραγγες μέσα σε βραχομάζες μη επηρεαζόμενες σημαντικά από τον κερματισμό τους, και τον επαναδιατύπωσε με το όριο ΙΙ, λαμβάνοντας υπόψη την αντοχή του (άρρηκτου) πετρώματος:

$$\delta_i/R\ (\%)=1.073\ C_0^{-0.318}\ [\text{MPa}] \tag{5-3}$$

σύμφωνα με το οποίο όταν οι παρατηρούμενες συγκλίσεις το υπερβαίνουν αναμένονται προβλήματα σύνθλιψης. Όρισε επίσης άλλα δύο όρια επικινδυνότητας παράλληλα εκατέρωθεν, τα Ι και ΙΙΙ, με συντελεστές 0.42 και 2.5. Στη συνέχεια, οι Chern et al. (1998) καθόρισαν για διακλασμένα πετρώματα τα ίδια 3 όρια επικινδυνότητας πραγματικής παραμόρφωσης: Ι, ΙΙ και ΙΙΙ, με βάση όμως την αντοχή της βραχομάζας (Πίνακας 5-7). Μεταξύ αυτών των επιπέδων διαμορφώνονται 4 κατηγορίες επικινδυνότητας των σηράγγων και για κάθε μια από αυτές διατύπωσαν την κατάσταση επικινδυνότητάς. Τα όρια αυτά είναι χρήσιμα κυρίως κατά την κατασκευή του έργου, καθόσον δίνουν γενικές οδηγίες αντιμετώπισης των καταστάσεων.



Σχήμα 5-6. Εμπειρικός συσχετισμός μεταξύ της συμπεριφοράς της σήραγγας και της μονοαξονικής αντοχής της βραχομάζας $C_0=\sigma_{cm}$ (ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ ΑΕ, 2003).

Πίνακας 5-7. Όρια επικίνδυνης παραμόρφωσης κατά Chern et al. (1998)

$\varepsilon_c=\delta_{ic}/R$ (%)	Οριο I $0.42\ \sigma_{cm}^{-0.318}$ * σ_{cm} σε MPa	Οριο II $1.073\ \sigma_{cm}^{-0.318}$	Οριο III $2.5\ \sigma_{cm}^{-0.318}$
Βύθιση (cm) οροφής σήραγγας διαμέτρου 10m Sakurai (1979) A: σ_c>100MPa B: 5<σ_c<100 C: σ_c<5MPa	 0.3-0.5 0.5-1.0 1.0-3.0	 1.0-1.5 1.5-4.0 4.0-9.0	 3.0-4.0 4.0-11.0 11.0-27.0

Κατηγορία ** επικινδυνότητας ** Ορισμοί δικοί μας	A Σταθερή	B Σταθερή με υποστήριξη	Γ Ασταθής	Δ Πολύ ασταθής

Οι κατηγορίες επικινδυνότητας περιγράφονται ως εξής:

Κατηγορία επικινδυνότητας Α: Κάτω από το όριο I, $\varepsilon_c=\delta_{ic}/R$ (%) < $0.42\ C_0^{-0.318}$

Η σήραγγα είναι σταθερή. Οι εργασίες κατασκευής μπορούν να προχωρήσουν, χωρίς να απαιτείται η λήψη ειδικών μέτρων.

Κατηγορία επικινδυνότητας Β: Μεταξύ των ορίων I και II, $0.42\ C_0^{-0.318} < \varepsilon_c=\delta_{ic}/R$ (%) < $1.073\ C_0^{-0.318}$

Η σήραγγα είναι ακόμη σταθερή. Οι εργασίες κατασκευής μπορούν να προχωρήσουν, θα αυξηθεί όμως η συχνότητα λήψης των μετρήσεων και των επί τόπου παρατηρήσεων.

Κατηγορία επικινδυνότητας Γ: Μεταξύ των ορίων II και III, $1.073\ C_0^{-0.318} < \varepsilon_c=\delta_{ic}/R$ (%) < $2.5\ C_0^{-0.318}$

Η σήραγγα υπόκειται σε αστάθεια. Οι εργασίες κατασκευής θα διακοπούν προσωρινά, και θα αυξηθεί η συχνότητα των μετρήσεων και των επιτόπου οπτικών παρατηρήσεων. Θα διερευνηθούν τα πιθανά αίτια αστάθειας, συμπεριλαμβανομένων του μηχανισμού αστοχίας, της ποσότητας των μέτρων υποστήριξης, της

διαδικασίας εκσκαφής και του χρονισμού εγκατάστασης των μέτρων. Θα τοποθετηθεί πρόσθετη υποστήριξη ή, εφόσον απαιτείται, θα αναθεωρηθεί η κατασκευαστική διαδικασία.

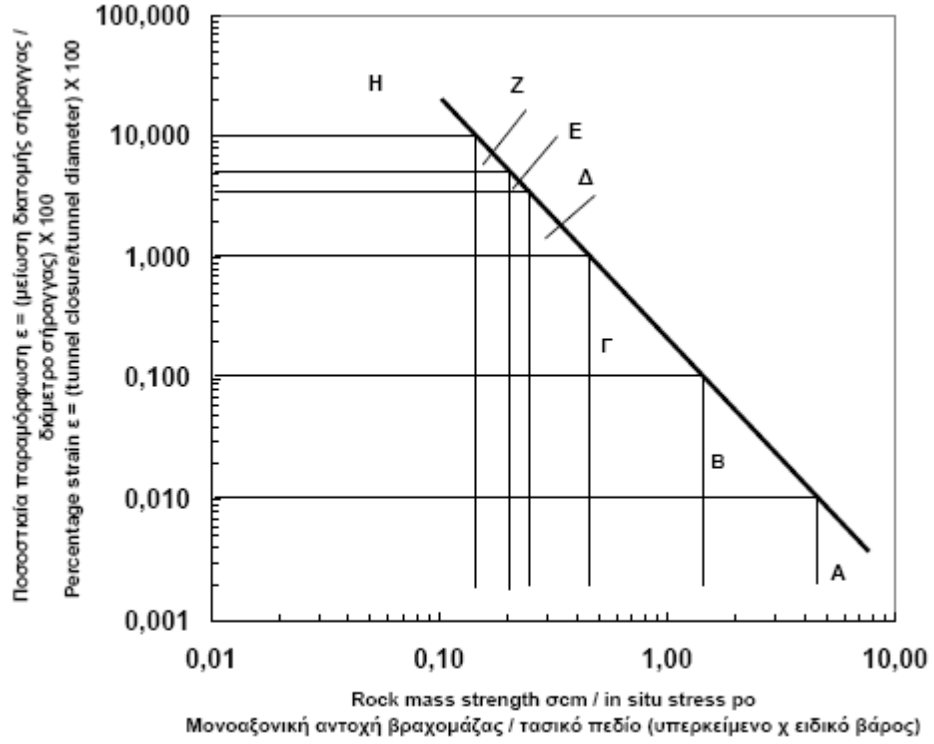
Κατηγορία επικινδυνότητας Δ: Πάνω από το όριο III, $\varepsilon_c=\delta_{ic}/R$ (%) > 2.5 $C_0^{-0.318}$

Η σήραγγα υπόκειται σε αστάθεια και οι εργασίες θα πρέπει να ανασταλούν. Θα διενεργηθεί λεπτομερής επιθεώρηση σχετικά με τις συνθήκες της σήραγγας και θα αυξηθεί η συχνότητα των μετρήσεων και των επί τόπου παρατηρήσεων. Θα ελεγχθούν τα αίτια της αστάθειας και θα ληφθούν διορθωτικά μέτρα, όπως δοκοί προπορείας, πολλαπλά μέτωπα εκσκαφής, χαλύβδινα πλαίσια και σκυρόδεμα. Θα αναθεωρηθεί η μελέτη της υποστήριξης και της διαδικασίας κατασκευής. Οι εργασίες μπορούν να ξεκινήσουν μόνο μετά την εφαρμογή των διορθωτικών μέτρων και τη σταθεροποίηση της σήραγγας.

5.3.1.6 Οριακή παραμόρφωση Αποκοπή από ελαστοπλαστικό πέτρωμα. Μεταφέρουμε ότι χρειάζεται και δεν είναι επιπλέον

Σύμφωνα με την παραπάνω ελαστοπλαστική ανάλυση, η χαρακτηριστική καμπύλη του πετρώματος της σήραγγας (τουλάχιστον στα πλευρά) τέμνει τον άξονα των τεταγμένων μετά από συγκεκριμένη σύγκλιση. Τούτο θα σήμαινε ότι αν αφήναμε οποιαδήποτε σήραγγα να παραμορφωθεί επαρκώς, δεν θα απαιτούνταν καθόλου υποστήριξη. Όμως τούτο δε συμβαίνει, καθόσον μετά από κάποια παραμόρφωση, το πέτρωμα αποδομείται και η παραμένουσα αντοχή του μειώνεται σημαντικά, ενώ τα μέτρα στήριξης αδυνατούν να παραλάβουν τις επιβαλλόμενες παραμορφώσεις.

Ήδη από τους πρωτοπόρους της ΝΑΤΜ ήταν γνωστό ότι τα προβλήματα διάνοιξης μιας σήραγγας αυξάνουν με τη μείωση της σχετικής αντοχής, ήτοι του λόγου της αντοχής του πετρώματος με το βάθος. Η σχολή του Hoek, η οποία ακολουθείται από τους περισσότερους φορείς στην Ελλάδα, θεωρεί ότι η επιλογή της υποστήριξης δύναται να βασιστεί στο μέγεθος της θεωρητικής παραμόρφωσης ανυποστήρικτης σήραγγας, ήτοι της παραμόρφωσης στην τομή της χαρακτηριστικής καμπύλης του πετρώματος με τον άξονα των συγκλίσεων. Η θεωρητική αυτή παραμόρφωση έχει συσχετιστεί αμφιμονοσήμαντα (Σχήμα 5-7), από τους Hoek and Marinos (2000), με τη σχετική αντοχή του επιτόπου πετρώματος $\sigma_{cm}/p_0=2/N_s$. Αυξανομένης της πρώτης ή μειούμενης της δεύτερης οι απαιτήσεις της διάνοιξης αυξάνουν, και δύνανται να ορίζονται μέσω οδηγιών κατηγοριοποίησής της, όπως στο Σχήμα 5-7. Για θεωρητικές συγκλίσεις <u>ανυποστήρικτης</u> σήραγγας μέχρι 1% ($\sigma_{cm}/p_0=0.45$) τα προβλήματα ευστάθειας εκτιμάται ότι είναι λίγα, ενώ για θεωρητικές συγκλίσεις πάνω από 2.5% ($\sigma_{cm}/p_0=0.28$) τα προβλήματα αρχίζουν να είναι ιδιαίτερα σοβαρά. Για πάνω από 10% ($\sigma_{cm}/p_0=\sim0.14$) σύγκλιση ανυποστήρικτης σήραγγας τα προβλήματα είναι ακραία.

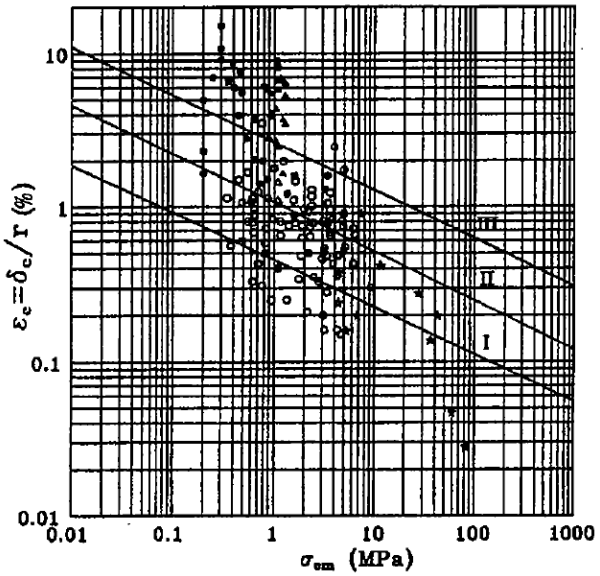


Σχήμα 5-7. Διάγραμμα εφαρμογής κατηγοριών μέτρων υποστήριξης (ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ ΑΕ)

Ο Sakurai (1983, 1997) και στη συνέχεια οι Chern et al. (1998) στο Σχήμα 5-8, διαβαθμίζουν τον κίνδυνο με βάση την πραγματική (λαμβανομένων υπόψη των μέτρων υποστήριξης) σύγκλιση σήραγγας και τη μονοαξονική αντοχή της βραχομάζας $\sigma_{cm}=C_0$ (εκτιμώμενη δια του δείκτη GSI). Τα όρια αυτά δίνονται από τις σχέσεις:

$$\varepsilon_{\theta\theta c} = \left(\frac{\delta_i}{R}\right)_c = (0.46\langle I\rangle; 1.073\langle II\rangle; 2.7\langle III\rangle) \cdot C_0^{-0.318};$$

(5-4)



Όρια σύγκλισης σήραγγας, σύμφωνα με την αντοχή της βραχομάζας (Chern et al., 1998)

	A	B	C
I	0.3~0.5	0.5~1	1~3
II	1~1.5	1.5~4	4~9
III	3~4	4~11	11~27

(Unit : cm)
(Radius of tunnel: 5.00m)

Οριακές βυθίσεις οροφής σήραγγας, σύμφωνα με τη μονοαξονική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος, (Sakurai, 1997)
A: σ_{ci}=>100MPa
B: σ_{ci}=5 - 100MPa
C: σ_{ci}< 5MPa

Σχήμα 5-8. Όρια επιφυλακής πραγματικής μετρούμενης σύγκλισης στις σήραγγες

Σύμφωνα με τις ΟΣΜΕΟ της ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ ΑΕ (2005):
(I) Κάτω από το όριο I, οι εργασίες κατασκευής μπορούν να προχωρήσουν, και δεν απαιτείται η λήψη ειδικών μέτρων
(II) Μεταξύ των ορίων I και II οι εργασίες κατασκευής μπορούν να προχωρήσουν, θα απαιτηθεί όμως αύξηση της συχνότητας λήψης των μετρήσεων και των επί τόπου παρατηρήσεων.
(III) Μεταξύ των ορίων II και III οι εργασίες κατασκευής θα πρέπει να διακοπούν προσωρινά, και θα αυξηθεί η συχνότητα των μετρήσεων και των επί τόπου παρατηρήσεων. Θα διεξαχθεί πλήρης έρευνα για τα πιθανά αίτια του προβλήματος συμπεριλαμβανομένων της ποσότητας των μέτρων υποστήριξης, του χρονισμού εγκατάστασης των μέτρων υποστήριξης και της διαδικασίας κατασκευής. Θα τοποθετηθεί πρόσθετη υποστήριξη εάν απαιτείται.
(IV) Πάνω από το όριο III θα πραγματοποιηθεί διακοπή εργασιών, θα αυξηθεί η συχνότητα των μετρήσεων και των επί τόπου παρατηρήσεων, θα διεξαχθεί πλήρης έρευνα για τα πιθανά αίτια του προβλήματος, θα αναθεωρηθούν θέματα της μελέτης ή / και διαδικασίες κατασκευής, θα εφαρμοστούν διορθωτικά μέτρα, και οι εργασίες θα μπορούν να ξεκινήσουν μόνο μετά την εφαρμογή των διορθωτικών μέτρων και αφού η τάση για αστάθεια έχει αντιστραφεί.
Δεξιά του σχήματος δίνονται τυπικά όρια βύθισης οροφής υποστηριγμένης σήραγγας για τρεις περιοχές αντοχής του άρρηκτου πετρώματος. Παρατηρούμε ότι οι αποδεκτές μετατοπίσεις υποστηριγμένης σήραγγας είναι γενικά κάτω από τα 1÷9 cm (όριο II), και όπως φαίνεται και από το διάγραμμα, κάτω από ~1%. Γενικά η κρίσιμη πραγματική παραμόρφωση $\varepsilon_{\theta\theta c}=(\delta_i/R)_c$ για αστοχία του συστήματος άμεσης υποστήριξης σύμφωνα με βιβλιογραφικές αναφορές και εμπειρία, μπορεί κατά μέσο όρο να θεωρηθεί ~ 1% (ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ ΑΕ, 2005).

5.3.2 Διάνοιξη σε δύο φάσεις με εύτροπη υποστήριξη - Νέα αυστριακή μέθοδος (NATM/NÖT, Spritzbetonbauweise)

Η NATM αναπτύχθηκε μεταξύ 1957 και 1965 στην Αυστρία και έλαβε το όνομα της το 1962, στο επιστημονικό συμπόσιο του Salzburg, προκειμένου να διαχωριστεί από την κλασσική παλαιά Αυστριακή μέθοδο. Η "νέα αυστριακή μέθοδος διάνοιξης σηράγγων" είναι μία ημιεπιστημονική-ημιεμπειρική λογική κατασκευής που χρησιμοποιεί τις αρχές μηχανικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων σε συνδυασμό με μετρήσεις παρακολούθησης της συμπεριφοράς υπογείων διανοίξεων κατά την κατασκευή τους. Η διατύπωση "κατασκευή και υποστήριξη με τη νέα αυστριακή μέθοδο" χρησιμοποιείται στη διεθνή αρθρογραφία για μία πληθώρα μεθόδων διάνοιξης σηράγγων, που περιλαμβάνουν ποικίλες τεχνικές. Είναι κατάλληλη κυρίως για σήραγγες μέσα σε μαλακές γεωμάζες που εξορύσσονται μηχανικά (Barton & Grimstad, 1994). Η θεωρητική της βάση στηρίζεται στη σχέση σύγκλισης αποτόνωσης γύρω από σήραγγες γνωστή σαν καμπύλη αντίδρασης του πετρώματος, στη σχέση σύγκλισης-φόρτισης της στήριξης και της διάδρασής της με το περιβάλλον πέτρωμα, και στην αναγνώριση της επίδρασης του χρόνου κατά την κατασκευή υπογείων ανοιγμάτων. Η επιλογή της μεθόδου διάνοιξης βασίζεται στην περιγραφική γεωτεχνική ταξινόμηση (συνήθως 6 κατηγορίες) και την κατάλληλη επιλογή προσωρινής στήριξης βασισμένη στην κατάταξη. Η στήριξη αυτή αποτελείται από εξωτερική επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, ήλωση της γεωμάζας, και πλαίσια συνήθως δικτυωτά. Λόγω της ασθενούς φύσης της γεωμάζας και του τύπου του έργου, κατασκευάζεται συνήθως μία δεύτερη εσωτερικής επένδυση από έγχυτο σκυρόδεμα προστατευμένης από αδιαπέρατη μεμβράνη και γεωύφασμα.

Η λέξη «μέθοδος» (method) που χρησιμοποιείται διεθνώς είναι ατυχής καθόσον δεν πρόκειται για συγκεκριμένη τεχνική εκσκαφής και υποστήριξης. Η NATM χρησιμοποιεί διάφορους ήδη δοκιμασμένους τρόπους εξόρυξης (με μηχανικά μέσα γενικά, αλλά και με ανατινάξεις) και υποστήριξης, με τη διαφορά ότι με τη συνεχή παρακολούθηση των μετακινήσεων στην περιφέρεια της σήραγγας και τη συνεχή αναθεώρηση της εφαρμοζόμενης υποστήριξης προσπαθεί να επιτύχει την πλέον σταθερή και οικονομική επένδυση.

Σε βαθιές σήραγγες η φόρτιση στην υποστήριξη οφείλεται κυρίως στην αποτόνωση των τάσεων (Vavrovsky, 1995). Τούτο σημαίνει ότι εύκαμπτες υποστηρίξεις επιτρέπουν σημαντικές μετατοπίσεις, όμως η ισορροπία επιτυγχάνεται σε χαμηλό επίπεδο πίεσης στην υποστήριξη. Επομένως, η υποστήριξη θα πρέπει να επιλέγεται βασικά με κριτήριο την οικονομικότητά της, χωρίς να διακυβεύεται η ασφάλεια. Η βελτιστοποίηση έχει να συγκεράσει, αφενός μεν τις ενέργειες σφράγισης της περιφέρειας για αποφυγή χαλάρωσης και απώλειας αντοχής της γεωμάζας, ενίσχυσης της διατμητικής της αντοχής, συγκράτησης της αποτόνωσης για περιορισμό των μετατοπίσεων, και στήριξης της χαλαρωμένης γεωμάζας, αφετέρου δε το κόστος υπερεκσκαφής για αντιστάθμιση των μετατοπίσεων και της επανεκσκαφής σε περιοχές συγκλίσεων εντός της γραμμής Α.

5.3.2.1 Ορισμός της NATM/NÖT

Βασικά στοιχεία του συστήματος στήριξης είναι η επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και ενίσχυση του πετρώματος με ηλώσεις. Οι εφαρμογές της μεθόδου δημοσιεύθηκαν αρχικά από τους Rabcewicz (1964) και Pacher (1964). Ο εκ των ιδρυτών της μεθόδου Muller (1978) δίνει 21 αρχές στις οποίες βασίζεται η μέθοδος, εκ των οποίων οι έξι βασικότερες είναι :

(1) Η αντοχή της γεωμάζας γύρω από μια σήραγγα πρέπει να κινητοποιηθεί σκόπιμα στη μεγαλύτερη δυνατή έκταση. Η κινητοποίηση της αντοχής της γεωμάζας επιτυγχάνεται επιτρέποντας την παραμόρφωσή της.
(2) Τοποθετείται κατάλληλη ελαφριά, εύκαμπτη, υποστήριξη, με λεπτή πρώτη στρώση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και ήλους αμέσως μετά την εκσκαφή, που καθορίζεται από την ταξινόμηση του πετρώματος. Η πρώτη στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος έχει σα σκοπό το σφράγισμα το ρωγμών και την προστασία τους από τη διάβρωση και την εν συνεχεία χαλάρωση. Η στρώση αυτή ουσιαστικά, λόγω ερπυστικών παραμορφώσεων του σκυροδέματος δεν αναλαμβάνει φορτία. Χαρακτηριστικό είναι ότι η μέθοδος αναπτύχθηκε συγχρόνως με την ανάπτυξη της τεχνικής του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.
(3) Μετρήσεις των μετακινήσεων και πιέσεων αμέσως μετά την τοποθέτηση της πρώτης στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Όπου απαιτείται, τα αποτελέσματα του ελέγχου αποτελούν τη βάση για αλλαγή της αρχικής (και μόνιμης) υποστήριξης, και για την ακολουθία των φάσεων της διάνοιξης.
(4) Κλείσιμο του ανάστροφου τόξου για μηχανική λειτουργία της σήραγγας σαν σωλήνα.
(5) Η μόνιμη υποστήριξη εκτελείται γενικά σε ένα μεταγενέστερο στάδιο.
(6) Ειδική σύμβαση κατασκευής του έργου που να επιτρέπει αλλαγές στον τρόπο διάνοιξης και υποστήριξης.

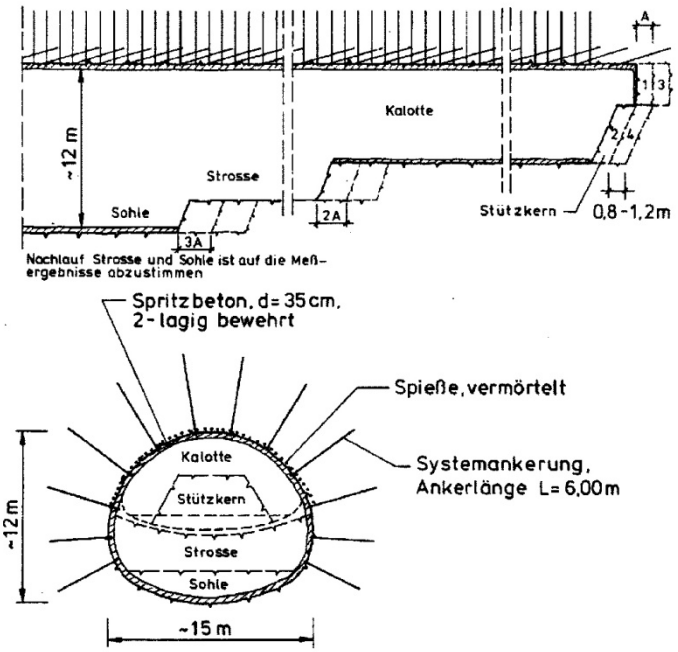
Οι αρχές της N.A.T.M. έχουν δεχθεί ισχυρότατες επικρίσεις (Kovari, 1993) διεθνώς τόσον ως προς την επιστημονικότητά τους, όσον και ως προς την οικειοποίησή τους από τη μέθοδο. Παρ' όλα αυτά, κατά την εφαρμογή της εφαρμόστηκαν για πρώτη φορά με επιστημονικό τρόπο οι αρχές της μηχανικής των πετρωμάτων, ούτως ώστε επιτρέποντας την ελεγχόμενη υπερφόρτιση ενός δακτυλίου πετρώματος πέριξ της εκσκαφής, να επιτυγχάνεται εξοικονόμιση μέτρων στήριξης. Έτσι, κατασκευάσθηκαν πάρα πολλά έργα με ασφάλεια και οικονομία χρησιμοποιώντας το όνομα της N.A.T.M. ως «μέθοδο κατασκευής». Η επιτυχία εκτέλεσής τους έγκειται (Anon., 1995) στην πρόσληψη, κάθε φορά, ειδικού από τον κύριο και τον κατασκευαστή του έργου. Κατά την κατασκευή ο πρώτος συμβουλεύει τους δεύτερους στη σταδιακή υποστήριξη του πετρώματος με τα παραπάνω αναφερθέντα ευέλικτα μέτρα, βασιζόμενος στην παρακολούθηση του πετρώματος. Κατόπιν των ανωτέρω έχει προταθεί (Anon., 1995) η μετονομασία της σε "Σταδιακή Υποστήριξη βάσει της Μεθόδου της Παρατήρησης" (I.S.O.M.). Η μέθοδος αυτή έχει εφαρμογή μόνο σε μαλακά πετρώματα.

5.3.2.2 Φάσεις διάνοιξης

Η N.A.T.M. εφαρμόζεται είτε με ολομέτωπη εκσκαφή της διατομής, είτε με ολομέτωπη εκσκαφή της διατομής με προπορευόμενη τη διάνοιξη ερευνητικής στοάς, είτε με προπορευόμενη την εκσκαφή της άνω ημιδιατομής (Kalotte, top heading) είτε με διάνοιξη και στήριξη επιμέρους τμημάτων της διατομής.

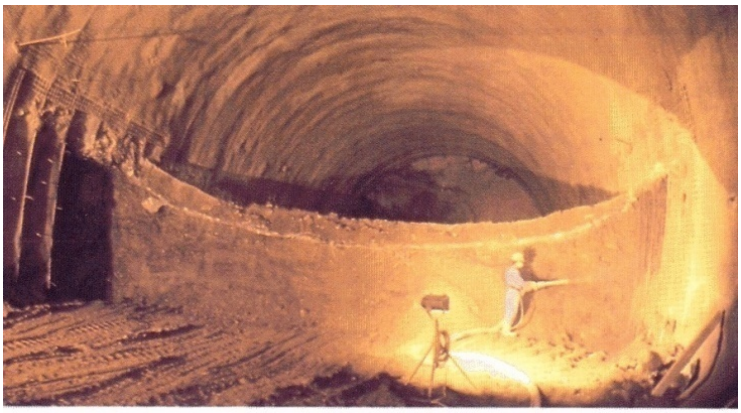
Σε σταθερά πετρώματα η διάνοιξη μπορεί να πραγματοποιηθεί σε μία φάση ακόμη και για διαμέτρους εκσκαφής μέχρι και 12m. Κατά την ολομέτωπη κοπή της διατομής αποκόπτονται φέτες ολόκληρης της διατομής του μετώπου, η δε προσωρινή υποστήριξη ακολουθεί σε μικρή ή μεγαλύτερη απόσταση το μέτωπο. Η τελική στήριξη ακολουθεί σε μεγάλη απόσταση ή κατασκευάζεται μετά το πέρας της διάνοιξης. Το σκυρόδεμα του ανάστροφου τόξου, όπου αυτό απαιτείται, κατασκευάζεται μετά (ή αν απαιτείται στατικά συγχρόνως με) την κατασκευή της προσωρινής υποστήριξης αλλά πριν την κατασκευή της τελικής. Η αποτελεσματικότητα της τεχνικής εξαρτάται από τις σχέσεις "Χρόνος ευστάθειας - Ταχύτητα κατασκευής της προσωρινής στήριξης", "Παραμόρφωση του πετρώματος - Κλείσιμο του δαπέδου" και "Βάθος κοπής ή ανατίναξης - Ταχύτητα αποκομιδής". Σε στοές και σήραγγες διαμέτρου μέχρι 3.5 μέτρα, η εκσκαφή γίνεται ολομέτωπα σε όλα τα πετρώματα, εκτός από τις περιπτώσεις μπαζών, πλήρως κατακερματισμένων και εύθρυπτων πετρωμάτων, και καταστάσεων υψηλής πίεσης νερού. Με την αύξηση της διαμέτρου από 3.5 σε 12 μέτρα η εφαρμογή της ολομέτωπης διάνοιξης μειώνεται, λόγω του μικρού χρόνου ευστάθειας και της απαίτησης κλεισίματος του δαπέδου.

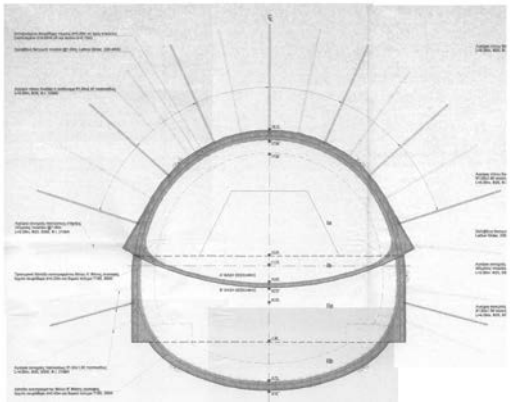
Η διάνοιξη με προπορευόμενη την εκσκαφή άνω ημιδιατομής (Kalotte, top heading) ονομάζεται και βόρεια (Nordische) τεχνική επειδή εφαρμόσθηκε στις Βόρειες χώρες και κυρίως στη Νορβηγία. Η άνω ημιδιατομή δύναται να προπορεύεται κατά 3 με 10 μέτρα (Σχήμα 5-9), εν τούτοις κατασκευαστικοί λόγοι συνήθως επιβάλουν τη διακριτή κατασκευή άνω και κάτω ημιδιατομής, με τη δεύτερη να κατασκευάζεται συχνά σε μεγάλη απόσταση ή και μετά το πέρας της πρώτης. Η μέθοδος στοχεύει σε μικρή χαλάρωση του πετρώματος στην περίπτωση μικρών συνεργείων, εφαρμόζοντας οριζόντια διατρήματα για την εκσκαφή της άνω ημιδιατομής και κατακόρυφα διατρήματα για την εκσκαφή της βαθμίδας. Στην περίπτωση μεγάλων συνεργείων, στοχεύει στη γρήγορη υποστήριξη της άνω ημιδιατομής χωρίς τη χρήση ικριωμάτων και αποκομιδή των μπαζών από το δάπεδο. Η μέθοδος πλεονεκτεί από τις παλαιότερες μεθόδους, καθόσον δίνει τη δυνατότητα σύγχρονης εξόρυξης της άνω και κάτω ημιδιατομής, γρήγορης κατασκευής της προσωρινής υποστήριξης, και αποφυγής ικριωμάτων.



Σχήμα 5-9. Διάνοιξη σε φάσεις της σήραγγας Himmelberg σε θρυμματιζόμενο πέτρωμα (Maidl, 2004)

Η υποστήριξη προσφέρει εκείνη την αντίδραση που απαιτείται προκειμένου να ισορροπήσει η διάνοιξη προτού αρχίσει το πέτρωμα να χαλαρώνει. Επομένως μια δύσκαμπτη υποστήριξη που θα τραβούσε επάνω της τις τάσεις του πετρώματος θα απαιτούσε μεγάλη αντοχή, ιδίως σε βαθιά έργα, και επομένως θα ήταν αντιοικονομική. Η μέθοδος επομένως επιζητεί την τοποθέτηση της υποστήριξης σε ποσότητα και χρόνο επιλεγμένα έτσι ώστε να παραλαμβάνει το ελάχιστο δυνατό φορτίο, ενώ στο περιβάλλον πέτρωμα ανατίθεται η ανάληψη του μέγιστου δυνατού φορτίου χωρίς αυτό να χαλαρώσει. Ο χρόνος τοποθέτησης της υποστήριξης προεκτιμάται εμπειρικά και με στατικούς υπολογισμούς σε προσομοιώματα βασισμένα είτε σε προκαταρκτικές δοκιμές στη βραχομάζα είτε σε δοκιμές εργαστηρίου, κατά τη διάρκεια δε της εκσκαφής με βάση μετρήσεις μετακινήσεων και παραμορφώσεων.





Σχήμα 5-10. Αριστερά: Σήραγγα Rupertus διανοιγμένη με τις αρχές της NATM (Sauer, 1994). Δεξιά: Σήραγγα Διχαλορέματος ΠΑΘΕ, διανοιγμένη σε μάργες.

5.3.2.3 Αυξομείωση των μέτρων διάνοιξης

Επειδή πρέπει να υπάρχει δυνατότητα εύκολης μεταβολής της άμεσης υποστήριξης, τόσον σε μηχανικές ιδιότητες, όσον και σε διαστάσεις, χρησιμοποιούνται φορείς από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα οπλισμένο με πλέγμα ή άοπλο, ηλώσεις του πετρώματος και χαλύβδινα τόξα, συνήθως δικτυωτά (Σχήμα 5-10). Η σήραγγα συμπεριφέρεται σαν ένας ενιαίος φορέας αποτελούμενος από την επένδυση και το περιβάλλον πέτρωμα.

Εφόσον η προβλεπόμενη μέθοδος διάνοιξης δεν ισορροπεί τη διατομή, τότε μπορούν να ληφθούν τα παρακάτω πρόσθετα μέτρα:

- Μείωση του μήκους προχώρησης.
- Σταθεροποίηση του μετώπου με παραμένον ύβωμα από μάζα πετρώματος.
- Σταθεροποίηση του μετώπου με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.
- Προπασσάλωση του θόλου.
- Αύξηση του πάχους σκυροδέματος της επένδυσης.
- Αύξηση του αριθμού και του μήκους των ήλων.
- Πύκνωση των δικτυωτών ή ολόσωμων χαλύβδινων πλαισίων
- Αύξηση του πλάτους θεμελίωσης της επένδυσης από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.
- Τοποθέτηση προσωρινού ανάστροφου τόξου από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στην άνω ημιδιατομή.
- Βελτίωση του πετρώματος με ενέσεις κάτω, γύρω ή και μπρος από τη διάνοιξη.
- Διάνοιξη με πολλαπλά μέτωπα.
- Στράγγιση της εκσκαπτόμενης περιοχής.
- Εκσκαφή σε συνθήκες πιεσμένου αέρα.
- Εκσκαφή με προηγούμενη ψύξη του πετρώματος.

Στην περίπτωση που η θεμελίωση της επένδυσης της άνω ημιδιατομής δεν επαρκεί για τη συγκράτηση του θόλου, ειδικότερα κατά την εκσκαφή της βαθμίδας, τότε απαιτούνται μέτρα υποθεμελίωσής (Unterfangung, underpinning) της. Αυτά επιτυγχάνονται με την τοποθέτηση μικροπασσάλων και σχετικά δύσκαμπτης επένδυσης. Ως εκ τούτου η μέθοδος τότε ξεφεύγει από γενικές αρχές της NATM.

Για την επαύξηση της ασφάλειας ή για τοποθέτηση μιας μόνωσης, τοποθετείται συνήθως μία εσωτερική επένδυση καλούμενη και τελική υποστήριξη. Τόσον αυτή όσον και προσωρινή υποστήριξη θα πρέπει να είναι σχετικά λεπτές προκειμένου να μην αναλαμβάνουν ροπές κάμψης. Η τελική επένδυση θα παραλαμβάνει από την εξωτερική επένδυση πίεση μόνο και όχι διατμητικές τάσεις στη διεπιφάνεια. Ανάλογα με τον κίνδυνο διάβρωσής της, η προσωρινή επένδυση μπορεί να ληφθεί μερικά υπόψη κατά τη διαστασιολόγηση της τελικής υποστήριξης. Η ισχυροποίηση τόσον του εσωτερικού όσον και του εξωτερικού κελύφους γενικά δεν θα γίνεται με πάχυνση τους αλλά με όπλισή τους. Ειδικότερα η εξωτερική θα ενισχύεται κυρίως με χαλύβδινα τόξα και με αύξηση του μήκους και πλήθους των αγκυρίων.

Η σταθεροποίηση του ανοίγματος και η ασφάλειά του εκτιμάται με μετρήσεις σύγκλισης και μετακίνησης. Η επάρκεια της εξωτερικής επένδυσης ελέγχεται με συνεχή παρακολούθηση, σ' ένα αριθμό διατομών, των τάσεων μέσα στο σκυρόδεμα και στη διεπιφάνεια σκυροδέματος - βράχου. Επειδή η εξωτερική επένδυση εξασφαλίζει την ισορροπία της διατομής, η εσωτερική επένδυση διαστασιολογείται σα μία κατασκευή πρόσθετης ασφάλειας καθώς και ανάληψης εκείνων των φορτίων της εξωτερικής επένδυσης που λόγω διάβρωσης δεν θα μπορούν να αναληφθούν μετά πάροδο κάποιου χρόνου μέσα στη ζωή του έργου. Συνήθως η τελική επένδυση απαλλάσσεται από την ανάληψη υδροστατικών φορτίων, καθώς τοποθετείται πίσω της γεωΰφασμα που λειτουργεί ως στραγγιστήριο.

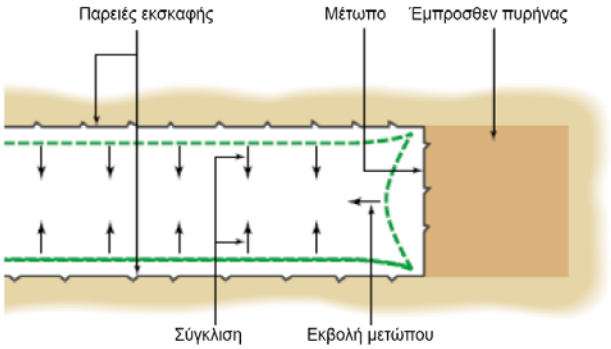
Η λογική της N.A.T.M. έχει ευρύτατο πεδίο εφαρμογής, είναι όμως ιδιαίτερα εφαρμόσιμη σε μεγάλες σήραγγες μέσα σε ισχυρά τεκτονισμένο πέτρωμα σε μεγάλα βάθη ή σε μικρότερου βάθους σήραγγες σε μαλακό έδαφος, δηλ. σε περιβάλλον πέτρωμα που δύναται να παραλάβει πλαστικές παραμορφώσεις και επομένως να υπάρχει δυνατότητα διάδρασης πετρώματος-κατασκευής.

Ο Πίνακας 5-6, στη μεσαία στήλη (διάνοιξη με αναβαθμό) δίνει τον τρόπο πραγματοποίησης της μεθόδου σύμφωνα με το βαθμό συνθλιψιμότητας του πετρώματος.

5.3.3 Ολομέτωπη διάνοιξη και δύστροπη υποστήριξη - ADECO-RS (Lunardi, 2000)

Κατά τη διάνοιξη σηράγγων σε μαλακούς σχηματισμούς, η ολομέτωπη διάνοιξη επιτρέπει το γρήγορο κλείσιμο του δακτυλίου της επένδυσης, την αποφυγή ζωνών φόρτισης-αποφόρτισης που δημιουργούνται από τα αλλεπάλληλα επιμέρους μέτωπα της τμηματικής διάνοιξης και της καθαίρεσης των προσωρινών αναστρόφων τόξων, την σε ένα επίπεδο κίνηση του εξοπλισμού διάνοιξης, και την επιτάχυνση της κατασκευής. Ανασταλτικός παράγων είναι η αστάθεια και επικινδυνότητα του μετώπου που υφίσταται στα μεγάλα ανοίγματα, εφόσον δεν ληφθεί ειδική μέριμνα για αυτό. Σύγχρονος εξοπλισμός επιτρέπει την σταθεροποίηση του μετώπου σε μαλακές γεωμάζες, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη μεθόδων για την ολομέτωπη διάνοιξη σηράγγων σε τέτοιους σχηματισμούς.

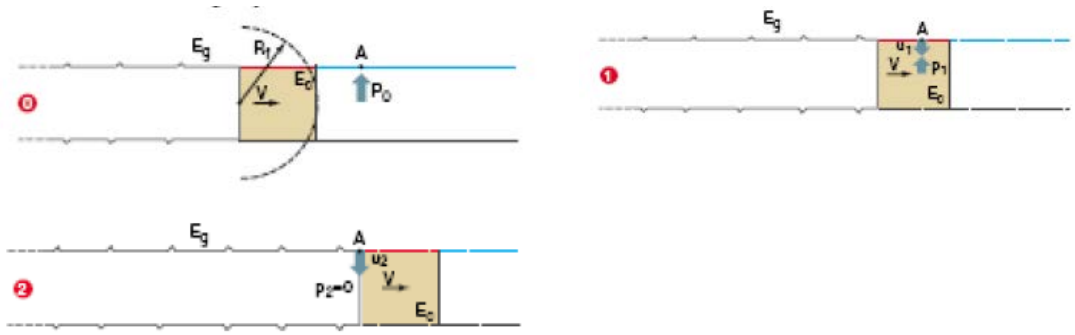
Η θεωρητική και πειραματική διερεύνηση του μηχανισμού, ο οποίος διέπει την συμπεριφορά της γεωμάζας κατά την όρυξη ενός υπόγειου ανοίγματος, υποδεικνύει ότι η παραμόρφωση (σύγκλιση, προ σύγκλιση, εκβολή του μετώπου) (Σχήμα 5-11) εξαρτάται από την επιδεκτικότητα σε παραμόρφωση του προχωρούντος έμπροσθεν πυρήνα. Ως έμπροσθεν πυρήνας ορίζεται η γεωμάζα που βρίσκεται έμπροσθεν του μετώπου, με πρακτικά κυλινδρική μορφή και γεωμετρικά χαρακτηριστικά, δηλαδή μήκος και πλάτος, κατά προσέγγιση ίσα με την διάμετρο της σήραγγας.



Σχήμα 5-11. Παραμορφώσεις στην περιοχή της εκσκαφής

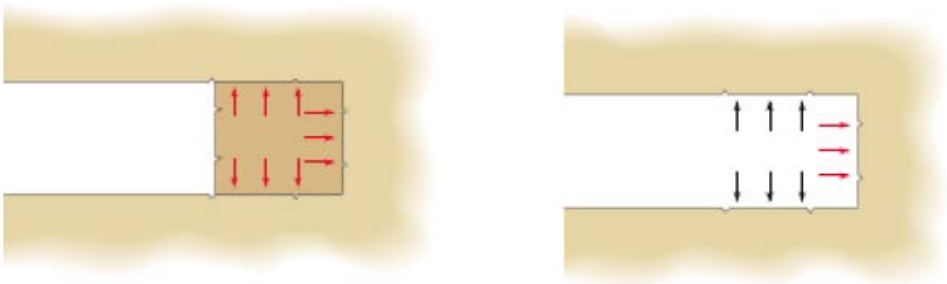
5.3.3.1 Η σημασία της γεωμάζας έμπροσθεν του μετώπου

Η μέθοδος ADECO RS, αποδίδει τις παραμορφώσεις εντός της σήραγγας στην προ σύγκλιση του έμπροσθεν πυρήνα. Ένα οποιοδήποτε σημείο Α, που βρίσκεται στην στέψη της θεωρητικής διατομής που πρόκειται να εκσκαφθεί, επιδέχεται ακτινική μετατόπιση προς το εσωτερικό της διατομής. Όσο το σημείο Α είναι μακριά από τη ζώνη επιρροής του μετώπου (Σχήμα 5-12-0), που εκτιμάται περίπου ίση με τη διάμετρο της σήραγγας, η εντατική κατάσταση του παραμένει αμετάβλητη. Με την προσέγγιση του μετώπου στο σημείο Α (Σχήμα 5-12-1), η ακτινική πίεση αυξάνει ωθώντας το σημείο προς το εσωτερικό του μελλοντικού ανοίγματος. Το μέγεθος της ακτινικής μετατόπισης του σημείου εξαρτάται από τα μηχανικά χαρακτηριστικά της γεωμάζας και από το εντατικό πεδίο όχι μόνον έξω από τα όρια της εκσκαφής αλλά και μέσα στον χώρο του προχωρούντος έμπροσθεν πυρήνα.



Σχήμα 5-12. Σημείο Α (0) εκτός της ζώνης επιρροής του μετώπου, (1) επί του προχωρούντος έμπροσθεν πυρήνα, (2) επί της παρειάς της εκσκαφής

Μετά την προχώρηση του μετώπου, στο σημείο Α (Σχήμα 5-12-2) και πέραν αυτού, αυτό θα συνεχίσει την ακτινική του μετατόπιση. Η συμπεριφορά της περιβάλλουσας γεωμάζας θα εξαρτάται από παράγοντες όπως το προϋπάρχον εντατικό πεδίο, τα χαρακτηριστικά της γεωμάζας πίσω από την επένδυση, η ακτινική πίεση της υποστήριξης, αλλά και το ιστορικό παραμόρφωσης. Η ελαχιστοποίηση των προϋπαρχουσών αυτών παραμορφώσεων σε δυσμενείς εδαφικές συνθήκες, έχει ιδιαίτερη σημασία για την ευστάθεια της σήραγγας, και εξαρτάται από την διασφάλιση της δυστροπίας του προχωρούντος έμπροσθεν πυρήνα. Ως εκ τούτου, πρέπει να λαμβάνονται δράσεις (Σχήμα 5-13) προϋποστήριξης (preconfinement) ή προβελτίωσης, (βλέπε Παράρτημα του κεφαλαίου) και όχι μόνον υποστήριξης (confinement). Ο Πίνακας 5-5 στη δεξιά στήλη, δίνει, για την ολομέτωπη διάνοιξη, υποδείξεις για τη διαμόρφωση του μετώπου και τα μέτρα στήριξης, με βάση τη συνθλιψιμότητα του πετρώματος.

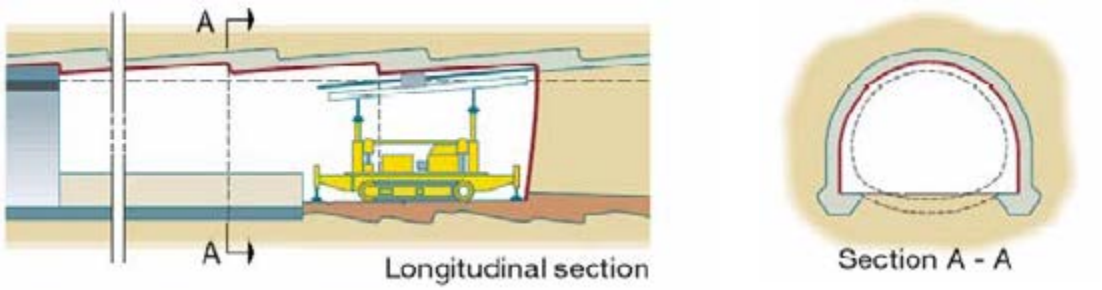


Σχήμα 5-13. Αριστερά: Προϋποστήριξη έμπροσθεν πυρήνα. Δεξιά: Ενεργητική υποστήριξη ανοίγματος, πλησίον μετώπου

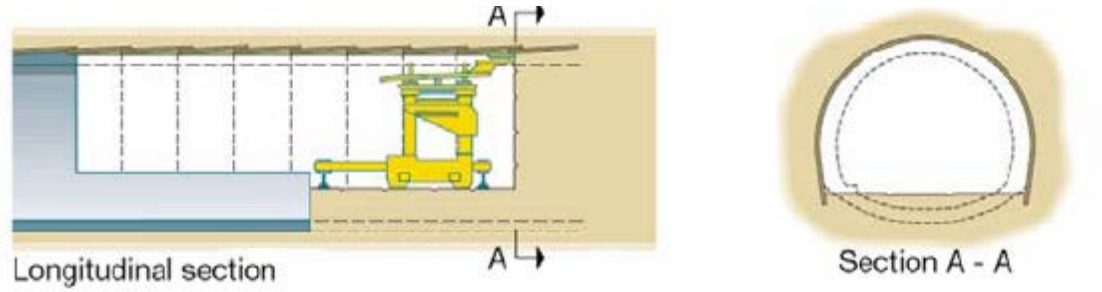
5.3.3.2 Έλεγχος του πυρήνα εμπρός από το μέτωπο

Προκειμένου να παρεμποδιστεί η παραμόρφωση του προχωρούντος έμπροσθεν πυρήνα, η μέθοδος ADECO-RS προτείνει πληθώρα τεχνικών επέμβασης οι οποίες διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

α. Ενέργειες οι οποίες αποσκοπούν στην προστασία με μείωση της φόρτισης του πυρήνα με προϋποστήριξή του, όπως είναι η εφαρμογή υποοριζόντιων εδαφοπασσάλων (jet grouting) (Σχήμα 5-14) ή κελύφους από άοπλο ή ινοπλισμένο σκυρόδεμα (Σχήμα 5-15) το οποίο τοποθετείται με τεχνικές (precutting) πρότμησης.

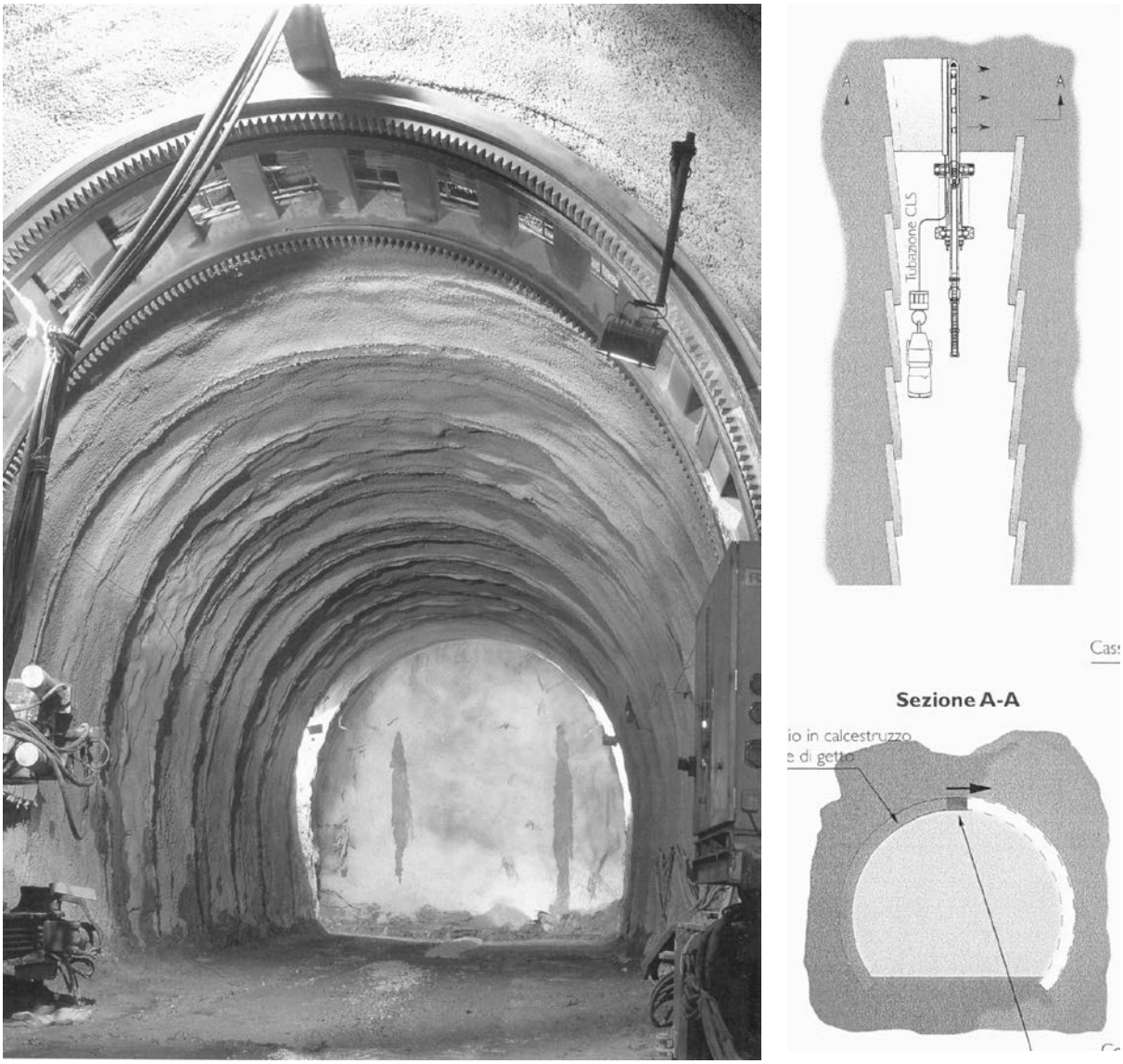


Σχήμα 5-14. Μηκοτομή και εγκάρσια τομή διάνοιξης με χρήση υποοριζόντιων εδαφοπασσάλων.



Σχήμα 5-15. Μηκοτομή και εγκάρσια τομή διάνοιξης με τεχνική πρότμησης της περιφέρειας (precutting)

Κατά την περιφερειακή πρότμηση, δημιουργείται εγκοπή μπρος από την οροφή του πετρώματος από ειδικό πριόνι επάνω σε φορείο (Σχήμα 5-16). Στην εγκοπή εισπιέζεται ταχύπηκτο σκυρόδεμα για την άμεση δημιουργία επένδυσης. Η εγκοπή δύναται να είναι συνεχής ή σημειακή. Στη δεύτερη περίπτωση η αψίδα δημιουργείται σε δύο φάσεις.



Σχήμα 5-16 Διάνοιξη με περιφερειακή πρότμηση

β. Ενέργειες ενίσχυσης, οι οποίες επεμβαίνουν απευθείας στη συνεκτικότητα του προχωρούντος έμπροσθεν πυρήνα, προκειμένου να βελτιώσουν τα φυσικά μηχανικά χαρακτηριστικά του, με χρήση μεθόδων προβελτίωσης του εδάφους, συνήθως με χρήση αγκυρίων από υαλοΐνες (fiberglass). Σημαντική είναι η απαίτηση για καλή πρόσφυση των ήλων με την περιβάλλουσα γεωμάζα, ώστε να μεταβιβάζονται με επιτυχία τα φορτία των ήλων σε αυτήν.

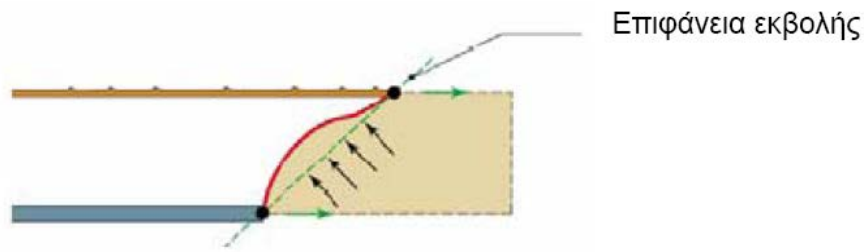
Παρά το γεγονός ότι οι παραπάνω μέθοδοι ελέγχου της συμπεριφοράς εμπρός από το μέτωπο έχουν κάθε μία συγκεκριμένο πεδίο εφαρμογής, όσον αφορά τη φύση του εδάφους στο οποίο χρησιμοποιούνται, στο σύνολό τους μπορούν να αποτελέσουν λύση για πρακτικά οποιεσδήποτε γεωτεχνικές συνθήκες. Σε ακραίες συνθήκες, μπορεί να γίνει συνδυασμένη εφαρμογή δύο ή περισσοτέρων τεχνικών, προκειμένου να επιτευχθεί τόσο η προστασία όσο και η ενίσχυση του πυρήνα.

5.3.3.3 Έλεγχος πίσω από το μέτωπο

Σε αντιδιαστολή με τις παραδοσιακές αρχές της σηραγγοποιΐας οι οποίες επιτρέπουν στον προχωρούντα πυρήνα να παραμορφωθεί και επιχειρούν κατόπιν να ελέγξουν τις παραμορφώσεις χρησιμοποιώντας ενδοτικά συστήματα υποστήριξης, μια πρακτική η οποία σε ακραίες εντατικές συνθήκες συχνά αποδεικνύεται ανεπαρκής, η μέθοδος ADECO-RS επιβάλλει την χρήση δύσκαμπτης επένδυσης (υποστήριξης), προκειμένου να διατηρηθεί το κεκτημένο πλεονέκτημα από την ενίσχυση του προχωρούντος έμπροσθεν του μετώπου πυρήνα.

5.3.3.4 Εκβολή του μετώπου

Οι αριθμητικές αναλύσεις (Lunardi, 2000) έχουν δείξει ξεκάθαρα ότι όταν παρατηρείται εκβολή του μετώπου, αυτή συντελείται σε μία σαφώς ορισμένη επιφάνεια (Σχήμα 5-17), η οποία εκτείνεται από το άνω ελεύθερο άκρο της επένδυσης (το σημείο διεπαφής της επένδυσης και της ανεπένδυτης γεωμάζας πλησίον της στέψης του μετώπου) ως το αντίστοιχο κάτω άκρο (το σημείο διεπαφής της επένδυσης στο ανάστροφο τόξο και της ανεπένδυτης γεωμάζας). Το κλείσιμο του ανάστροφου τόξου, κοντά στο μέτωπο, μειώνει τις διαστάσεις της επιφάνειας εκβολής (extrusion surface), γεγονός το οποίο συνεπάγεται τον περιορισμό του φαινομένου της εκβολής μετώπου και αντίστοιχα της προκαλούμενης σύγκλισης.



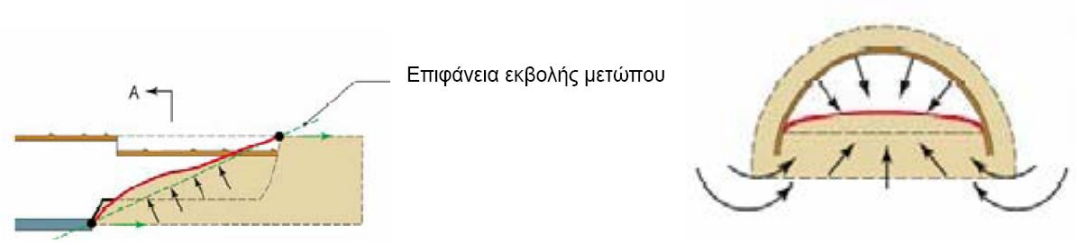
Σχήμα 5-17. Επιφάνεια εκβολής μετώπου

Οι ίδιες αναλύσεις, επίσης οδηγούν σε συμπεράσματα όπως ότι:

α) Οι παρατηρούμενες παραμορφώσεις είναι συγκρίσιμες, είτε η προχώρηση γίνεται σε βαθμίδες είτε με ολομέτωπη όρυξη μετώπου, και εξαρτώνται από την απόσταση του ανάστροφου τόξου από το μέτωπο.

β) Η προχώρηση με διάνοιξη σε βαθμίδες οδηγεί, πάντοτε σε μεγαλύτερες παραμορφώσεις, από αυτή που γίνεται με ολομέτωπη όρυξη (Σχήμα 5-18)

Η εκβολή επομένως του μετώπου ελέγχεται με την κατάλληλη επιλογή της θέσης που θα κλείσει το ανάστροφο τόξο.



Σχήμα 5-18. Παραμορφώσεις σε διάνοιξη με βαθμίδες

Η πρώτη εφαρμογή της ιταλικής μεθόδου στην Ελλάδα πραγματοποιήθηκε στις οδικές σήραγγες Γηροκομείου και Αρχαιολογικού χώρου, της ΠΑΘΕ στην παράκαμψη Πατρών. Στο Σχήμα 5-19 παρατηρούμε την εγγύτητα στο μέτωπο των εργασιών άμεσης σκυροδέτησης του μόνιμου ανάστροφου τόξου. Η στήριξη του μετώπου εξασφαλίζεται με ήλους από υαλοΐνες (fiberglass) μήκους 12m και υπερκάλυψη 3-4m.



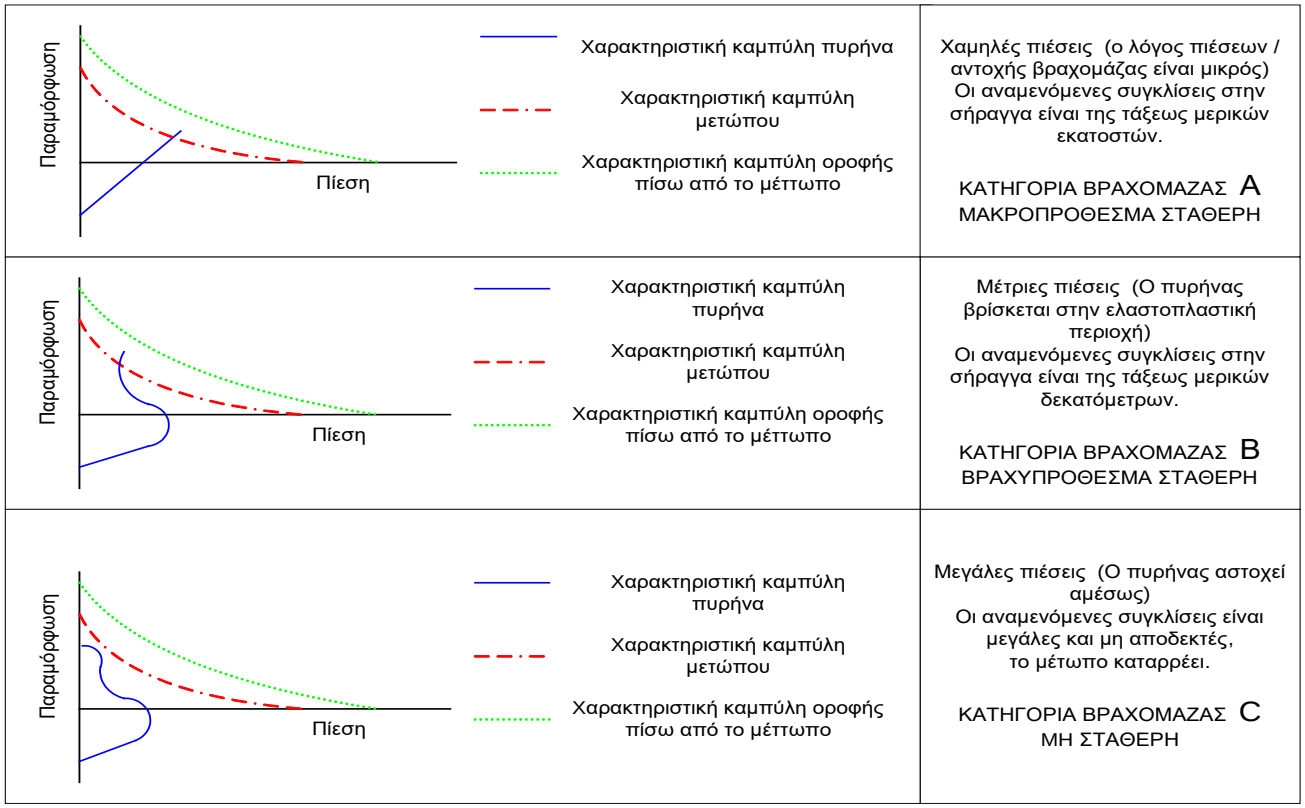
Σχήμα 5-19. Διάνοιξη σήραγγας Γηροκομείου της παράκαμψης Πατρών της ΠΑΘΕ.

5.3.3.5 Η μελέτη του έργου

Σύμφωνα με τον Lunardi (2000) και την μέθοδο ADECO-RS η βραχομάζα ταξινομείται σύμφωνα με την συμπεριφορά της σε 3 κατηγορίες, Α μακροπρόθεσμα σταθερή, Β βραχυπρόθεσμα σταθερή και C μη σταθερή (Σχήμα 5-20).

Στην κατηγορία Α το εντατικό πεδίο γύρω από την εκσκαφή είναι μικρότερο από την αντοχή των περιβαλλόντων πετρωμάτων, οι συγκλίσεις βρίσκονται στην ελαστική περιοχή και εκδηλώνονται αμέσως. Τυχόν αστάθεια οφείλεται μόνο σε τοπική αποκόλληση όγκων λόγω δυσμενών ασυνεχειών.

Στην κατηγορία Β το εντατικό πεδίο μπορεί να υπερβεί την αντοχή της βραχομάζας αλλά σχηματίζεται ένα φαινόμενο αψίδας γύρω και σε απόσταση από την εκσκαφή. Βραχυπρόθεσμα η εκσκαφή είναι σταθερή και η αστάθεια βελτιώνεται ή χειροτερεύει ανάλογα με την ταχύτητα προχώρησης και εκδηλώνεται από χαλαρό υλικό που αστοχεί στο μέτωπο και τις παρειές, υπάρχει όμως αρκετός χρόνος για την τοποθέτηση ακτινικών μέτρων σταθεροποίησης. Μερικές φορές απαιτείται η χρήση προβελτίωσης της βραχομάζας μπροστά από το μέτωπο, για το λόγο αυτό εφαρμόζονται μέτρα υποστήριξης στον πυρήνα μπροστά από το μέτωπο καθώς και στην περίμετρο της εκσκαφής ώστε να διατηρούνται οι συγκλίσεις σε αποδεκτά επίπεδα. Η παρουσία νερού επιβαρύνει την αστάθεια και γι΄αυτό το λόγο θα πρέπει να αποστραγγίζεται μπροστά από το μέτωπο.



Σχήμα 5-20. Περιγραφή συνθηκών βραχομάζας κατά Lunardi (2000), χωρίς υποστήριξη.

Στην κατηγορία C το εντατικό πεδίο είναι πολύ μεγαλύτερο από την αντοχή της βραχομάζας και έτσι δεν μπορεί να δημιουργηθεί φαινόμενο αψίδας οπότε αναμένεται άμεση κατάρρευση του μετώπου. Επειδή δεν υπάρχει χρόνος για τοποθέτηση μέτρων υποστήριξης, τα μέτρα σταθεροποίησης εφαρμόζονται πριν από το μέτωπο, με την ενίσχυση του πυρήνα και των πετρωμάτων γύρω από το μέτωπο, ώστε να αυξηθεί η αντοχή της βραχομάζας και να είναι ικανή να δημιουργήσει φαινόμενο αψίδας όταν θα εκσκαφθεί το μέτωπο. Σε τέτοιες βραχομάζες η παρουσία νερού μέσα στον πυρήνα πρέπει να αποφεύγεται με την χρήση συστημάτων αποστράγγισης.

Για την ταξινόμηση της βραχομάζας σε κάποια κατηγορία πρώτα συλλέγονται όλα τα κατάλληλα τοπογραφικά, γεωλογικά και γεωτεχνικά στοιχεία (Φάση Αναγνώρισης) και κατόπιν ελέγχονται οι συγκλίσεις των παρειών της εκσκαφής, με οποιοδήποτε τρόπο, δηλαδή αναλυτικό, θεωρητικό, εμπειρικό ή εργαστηριακό, καθώς και η εξώθηση (Protrusion) του πυρήνα της βραχομάζας που βρίσκεται μπροστά από το μέτωπο (Φάση Διάγνωσης). Αν δεν εφαρμοσθούν μέτρα υποστήριξης, οι αναμενόμενες συγκλίσεις για την κατηγορία Α είναι της τάξεως εκατοστών, της κατηγορίας Β της τάξεως δεκατόμετρων, ενώ για την κατηγορία C αναμένεται άμεση κατάρρευση του μετώπου.

Μετά την αναγνώριση και την ταξινόμηση της βραχομάζας σε κατηγορίες (Αναγνώριση και Διάγνωση) ακολουθεί η Φάση Θεραπείας. Ο Μελετητής αποφασίζει για το είδος της ενέργειας που θα εφαρμοσθεί σε κάθε κατηγορία και τα εργαλεία σταθεροποίησης που θα χρησιμοποιήσει,

Ο Lunardi (2000) θεωρεί ότι η αντιστήριξη που πρέπει να εξασκηθεί στο έργο επιδρά είτε για την διατήρηση των πλευρικών πιέσεων (σ_3), είτε για την βελτίωση των χαρακτηριστικών της βραχομάζας (βελτίωση των c, φ), είτε για την προστασία από υπόγεια νερά, που είναι στην ουσία συνδυασμός των προηγούμενων. Τα μέτρα αντιστήριξης δρουν ακτινικά από την εκσκαφή ή μπροστά στο μέτωπο. Στις περιπτώσεις όπου αναμένονται μεγάλες έως μη αποδεκτές συγκλίσεις γίνεται προβελτίωση του πυρήνα εδάφους γύρω και πίσω από το μέτωπο, πριν από την εκσκαφή που δρα σαν αντιστήριξη. Κάθε ανεξάρτητο μέτρο υποστήριξης ονομάζεται εργαλείο σταθεροποίησης.

Ο παρακάτω Πίνακας 5-8 παρουσιάζει τον τρόπο με τον οποίο επιδρά κάθε μέτρο υποστήριξης στην βραχομάζα. Με βάση την κατάταξη της βραχομάζας σε κατηγορίες και ανάλογα με το είδος της αντιστήριξης που πρέπει να εξασκηθεί, επιλέγονται κατάλληλα μέτρα υποστήριξης.

Πίνακας 5-8. Εφαρμογή τεχνικών σταθεροποίησης βραχομάζας (Lunardi 2000)

ADECO-RS : Τρόπος ενέργειας των διαθέσιμων τεχνικών σταθεροποίησης.						
Ολομέτωπη εκσκαφή						
Ενέργεια στην Εκσκαφή		Εργαλεία σταθεροποίησης	Ενέργεια εργαλείου			
			c, φ	σ_3	W	
Προβελτίωση	Βελτίωση της βραχομάζας μπροστά από το μέτωπο της εκσκαφής	Τσιμεντενέσεις (ο)	X	X	X	c,φ = Βελτίωση c και φ
		Κατάψυξη εδάφους		X	X	σ_3 = Διατήρηση της σ_3
		Παροριζόντιοι εδαφοπάσαλοι (ο)		X		W = νερό υπό πίεση
		Πρότμηση με μηχανικά μέσα (ο)		X		(ο) = δομικά στοιχεία
		Σωλήνες αποστράγγισης (ο)	X		X	
		Ενίσχυση μετώπου με αγκύρια από fiber-glass (ο)		X		
		Ενίσχυση εδάφους γύρω από την εκσκαφή με δοκούς από fiber-glass (ο)		X		
		Ενίσχυση βραχομάζας γύρω από την εκσκαφή με την βοήθεια στοάς προπορείας		X		
Υποστήριξη		Ενισχυμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (ο) (με πλέγμα, ίνες ή σιδηρά πλαίσια)		X		
		Ασπίδα με μηχανική πίεση εξισορρόπησης		X		
		Ασπίδα με πίεση λάσπης ή πολφού		X	X	
	Ακτινική βελτίωση της βραχομάζας	Αγκύρια σημειακής πάκτωσης (ο)		X		
		Αγκύρια ολόσωμης πάκτωσης (ο)	X			
		Κατασκευή ανεστραμμένου δαπέδου (ο)		X		
		Ασπίδα ανοικτού μετώπου		X		
Προ-Υποστήριξη		Δοκοί προπορείας				

Στην πράξη γίνεται συνδυασμός πολλών μέτρων υποστήριξης ώστε να ελαχιστοποιούνται όλες οι αιτίες αστάθειας. Ο Πίνακας 5-9 εξετάζει συνδυασμούς μέτρων υποστήριξης που μπορούν να εφαρμοσθούν για την σταθεροποίηση της βραχομάζας, ανάλογα με την κατηγορία της. Παρατηρούμε ότι ανάλογα με τις προβλεπόμενες συγκλίσεις και το σχετικό ποσοστό κατανομής μεταξύ προβελτίωσης και υποστήριξης που θέλουμε να πετύχουμε, καταλήγουμε να έχουμε ομάδες μέτρων αντιστήριξης. Με βάση αυτές τις ομάδες και τις πιθανές επιλογές, ο μελετητής κατατάσσει τις περιοχές του έργου σε κατηγορίες και σχεδιάζει τυπικές διατομές με κατασκευαστικές λεπτομέρειες για κάθε κατηγορία. (Φάση Θεραπείας).

Πίνακας 5-9. Επιλογή συνδυασμού μέτρων υποστήριξης ανάλογα με την κατηγορία της βραχομάζας (Lunardi, 2000)

Επιλογή μέτρων υποστήριξης με την μέθοδο ADECO-RS											
		Κατηγορία εδάφους									
Μέτωπο		Σταθερό		Βραχυπρόθεσμα σταθερό			Μη σταθερό				
		A1	A2	B1	B2	B3	C1	C2	C3	C4	C5
Εργαλείο σταθεροποίησης	Κοχλίες σημειακής αγκύρωσης	X									
	Κοχλίες ολόσωμης πάκτωσης	X									
	Ενισχυμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (με πλέγμα, ίνες ή σιδηρά πλαίσια	X	X	X	X		X	X	X	X	X
	Ενίσχυση μετώπου με αγκύρια από fiber-glass				X			X		X	
	Ακτινική ενίσχυση εδάφους γύρω από την εκσκαφή με δοκούς από fiber-glass									X	
	Κατασκευή ανεστραμμένου δαπέδου			X	X	X	X	X	X	X	X
	Πρότμηση με μηχανικά μέσα					X		X			
	Ακτινική ενίσχυση του πετρώματος γύρω από την εκσκαφή με την βοήθεια στοάς προπορείας								X		
	Παροριζόντιοι εδαφοπάσαλοι						X				
	Τσιμεντενέσεις										X
	Κατάψυξη εδάφους										X
	Σωλήνες αποστράγγισης	X	X	X	X	X	X	X		X	
	Δοκοί προπορείας		X								
Συγκλίσεις		Εκατοστών		Δεκατομέτρων			Μη αποδεκτές				

** Οι αναμενόμενες συγκλίσεις αναφέρονται σε διατομή χωρίς υποστήριξη.*

Κατά την διάρκεια της διάνοιξης του έργου (Φάση Κατασκευής) εφαρμόζονται οι κατάλληλες τυπικές διατομές με τα αντίστοιχα μέτρα σταθεροποίησης, όπως υποδείχθηκαν από την Φάση Θεραπείας. Για την σωστή κατασκευή του έργου απαιτείται συνεχής έλεγχος των συγκλίσεων (Φάση Ελέγχου) και της αλληλεπίδρασης βραχομάζας – υποστήριξης ώστε να γίνονται οι απαραίτητες τελικές διορθώσεις. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί ο σχεδιασμός του έργου, θα πρέπει να εκτιμηθεί η συμπεριφορά της γεωμάζας.

5.3.3.6 Τύποι συμπεριφοράς γεωμάζας

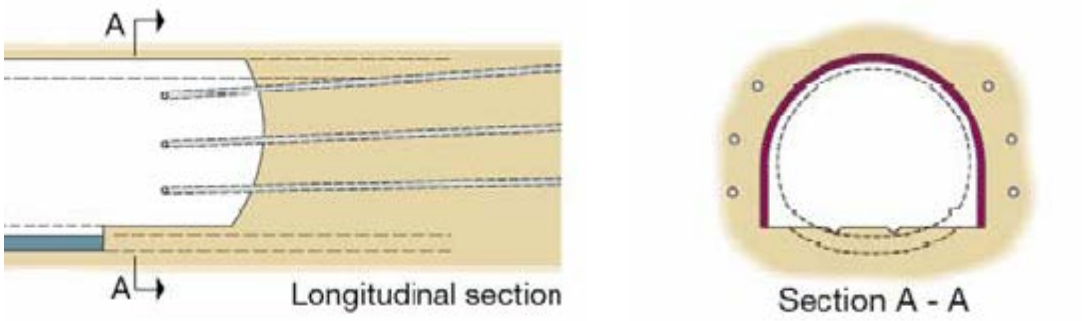
Η μέθοδος διαχωρίζει τρεις κύριες κατηγορίες συμπεριφοράς με βάση την ευστάθεια του μετώπου:

- Κατηγορία Α: Σταθερό μέτωπο, συμπεριφορά βράχου (stony type behavior). Οι μέθοδοι του προηγουμένου κεφαλαίου είναι κατάλληλες για διάνοιξη σε τέτοιου είδους πετρώματα.
- Κατηγορία Β: Βραχυχρόνια ευστάθεια μετώπου, συμπεριφορά συνεκτικού εδάφους (cohesive type behavior). Οι μέθοδοι αυτού του κεφαλαίου είναι κατάλληλες για διάνοιξη σε τέτοιου είδους πετρώματα.
- Κατηγορία C: Ασταθές μέτωπο, συμπεριφορά χαλαρού εδάφους (loose ground behavior). Απαιτείται πρόσθετη φροντίδα για την εξασφάλιση του μετώπου.

Η *κατηγορία Α*, αφορά τις περιπτώσεις εκείνες, όπου το υφιστάμενο εντατικό πεδίο δεν υπερβαίνει την αντοχή της βραχομάζας. Με τη διάνοιξη της σήραγγας οι τάσεις στο περιβάλλον πέτρωμα εκτρέπονται

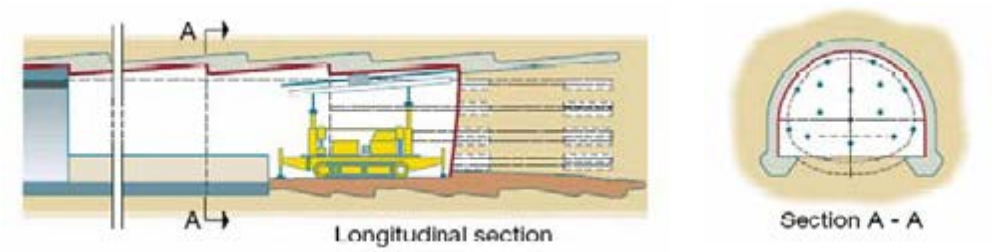
δημιουργώντας νοητή αψίδα (arch effect). Οι παραμορφώσεις αναπτύσσονται στην ελαστική περιοχή και είναι της τάξης των χιλιοστών. Το μέτωπο στο σύνολο του είναι ευσταθές, ενώ τοπική αστάθεια υφίσταται μόνο στα σημεία στα οποία εμφανίζονται σφήνες με κίνδυνο ολίσθησης ή ανατροπής. Η ανισοτροπία διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο. Η παρουσία υδροφορίας δεν επηρεάζει την ευστάθεια της εκσκαφής ακόμα και σε περίπτωση υδροδυναμικού καθεστώτος (hydrodynamic conditions), με εξαίρεση την ενδεχόμενη μηχανική ή χημική απομείωση των μηχανικών χαρακτηριστικών της βραχομάζας καθώς και την πιθανή ελάττωση της διατμητικής αντοχής σε επιφάνειες ολίσθησης (ασυνέχειες-slip surfaces) λόγω έντονης ροής και της συνεπακόλουθης απόπλυσης του υλικού πλήρωσης των ασυνεχειών. Η επένδυση εφαρμόζεται κυρίως για την αποτροπή της αποσάθρωσης της βραχομάζας και τη διασφάλιση της γεωμετρίας της διατομής.

Η *κατηγορία Β*, αφορά τις περιπτώσεις εκείνες, όπου το υφιστάμενο εντατικό πεδίο επαρκεί για να ξεπεραστεί η αντοχή της γεωμάζας στην περιοχή του μετώπου και στην περιφέρεια της εκσκαφής. Φαινόμενα λειτουργίας αψίδας, δεν εμφανίζονται άμεσα στα όρια της περιφέρειας της διάνοιξης, αλλά σε απόσταση εξαρτώμενη από το πάχος της ζώνης στην οποία η γεωμάζα υπόκειται σε διαρροή. Οι παραμορφώσεις οι οποίες παρουσιάζονται για κανονικούς ρυθμούς προχώρησης, είναι ελαστοπλαστικές και οι συγκλίσεις της τάξης των εκατοστών. Το μέγεθος του ρυθμού προχώρησης καθορίζει την ευστάθεια της εκσκαφής. Για μέσους (κανονικούς) ρυθμούς προχώρησης το άνοιγμα είναι βραχυπρόθεσμα ευσταθές ενώ για αύξηση ή ελάττωση αυτών, η σταθερότητα αυξάνει ή ελαττώνεται αντίστοιχα. Η παραμόρφωση του προχωρούντος έμπροσθεν πυρήνα, η οποία και εκφράζεται ως εκβολή του μετώπου δεν έχει επίπτωση στην σταθερότητα του ανοίγματος και τούτο οφείλεται στην παραμένουσα αντοχή της γεωμάζας. Η αστάθεια δύναται να εκφραστεί υπό μορφή αποκόλλησης υλικού στις παρειές της εκσκαφής και στην επιφάνεια του μετώπου, που όμως υπάρχει χρόνος για να αντιμετωπιστούν με μέτρα περιμετρικής υποστήριξης. Η προ ενίσχυση (preconfinement) του έμπροσθεν μετώπου συχνά λειτουργεί θετικά για τη διάνοιξη, καθόσον με την επιλογή κατάλληλων μέτρων υποστήριξης στην περιφέρεια και στο μέτωπο, ελέγχονται οι παραμορφώσεις σε αποδεκτά όρια. Η παρουσία υδροφορίας, και ειδικά υδροδυναμικών καταστάσεων, απομειώνει τη διατμητική αντοχή της βραχομάζας, εντείνει τα φαινόμενα διαρροής και συνεπώς την αστάθεια της διάνοιξης. Αντιμετωπίζεται με τεχνικές αποστράγγισης και απομάκρυνσης των υδάτων από την περιοχή του προχωρούντος έμπροσθεν πυρήνα (Σχήμα 5-21).



Σχήμα 5-21. Μηκοτομή και εγκάρσια τομή υλοποιημένων μέτρων αποστράγγισης έμπροσθεν πυρήνα

Η *κατηγορία C*, αφορά τις περιπτώσεις εκείνες όπου το εντατικό πεδίο υπερβαίνει αισθητά την αντοχή της γεωμάζας. Φαινόμενο λειτουργίας αψίδας δεν μπορεί να δημιουργηθεί ούτε στην περιοχή του μετώπου, ούτε στην περιφέρεια της εκσκαφής λόγω της απουσίας επαρκούς παραμένουσας αντοχής του εδάφους. Οι παραμορφώσεις αναπτύσσονται άμεσα και εξελίσσονται σε αστοχία του μετώπου και κατάρρευση της εκσκαφής. Ο ελάχιστος χρόνος ευστάθειας της εδαφομάζας, καθιστά την εφαρμογή μέτρων περιφερειακής υποστήριξης πρακτικά αδύνατη, επιτάσσοντας συνεπώς την χρήση τεχνικών βελτίωσης του εδάφους έμπροσθεν του μετώπου (Σχήμα 5-22) που θα επιτρέψουν τη διατήρηση του υπόγειου ανοίγματος με την ασφαλή εκτροπή των τάσεων εκτός αυτού.



Σχήμα 5-22. Μηκοτομή και εγκάρσια τομή. Εδαφοπάσσαλοι στην περιφέρεια και αγκύρια μετώπου από υαλοΐνες.

Η παρουσία υδροφορίας εντείνει την ήδη δυσμενή κατάσταση ευνοώντας την επέκταση των φαινομένων πλαστικοποίησης και την περαιτέρω απομείωση των μηχανικών χαρακτηριστικών της εδαφομάζας. Η έντονη ροή δύναται να προκαλεί μη αποδεκτή μεταφορά εδαφικού υλικού. Κρίνεται επομένως απαραίτητη η αποστράγγιση της εδαφομάζας και η απομάκρυνση των υδάτων από την περιοχή του προχωρούντος έμπροσθεν πυρήνα.

5.3.3.7 Φάσεις μελέτης - κατασκευής

Οι φάσεις της *μελέτης* είναι τρεις, ήτοι η φάση αξιολόγησης των πεπραγμένων, η φάση διάγνωσης, και η φάση θεραπείας.

Φάση αξιολόγησης. Σε αυτή καθορίζεται η φύση της γεωμάζας που επηρεάζεται από τη σήραγγα, σε όρους εδαφομηχανικής και βραχομηχανικής, που είναι απαραίτητη για την ανάλυση της μηχανικής συμπεριφοράς της.

Φάση διάγνωσης. Σε αυτή χρησιμοποιούνται τα στοιχεία που συλλέχθηκαν στην προηγούμενη φάση, για να χωριστεί η σήραγγα σε περιοχές με ομοιόμορφη γεωτεχνική συμπεριφορά, σύμφωνα με τις κατηγορίες A, B, C, όπως περιγράφονται παραπάνω. Η διάκριση επιτυγχάνεται με την πραγματοποίηση γεωστατικών αναλύσεων της διάνοιξης χωρίς τη χρήση μέτρων υποστήριξης. Προσδιορίζονται λεπτομέρειες για τις αναμενόμενες παραμορφώσεις και τα φορτία που θα αναπτυχθούν.

Φάση θεραπείας. Σε αυτή προσδιορίζονται, στη βάση των προβλέψεων που πραγματοποιήθηκαν στην προηγούμενη φάση και την κατάταξη σε μία από τις τρεις κατηγορίες συμπεριφοράς, (A, B, C), ποιες ενέργειες θα πραγματοποιηθούν και τα μέτρα εφαρμογής τους, ώστε να επιτευχθεί σταθερότητα της σήραγγας. Με αναλυτικές μεθόδους επιβεβαιώνεται η αποτελεσματικότητα των επιλεγμένων μεθόδων.

Το στάδιο *κατασκευής* περιλαμβάνει φάσεις διάνοιξης και παρακολούθησης.

Φάση διάνοιξης. Η σήραγγα κατασκευάζεται σύμφωνα με την μελέτη.

Φάση παρακολούθησης (monitoring). Σε αυτήν πραγματοποιείται παρακολούθηση της συμπεριφοράς της σήραγγας τόσον κατά τη διάνοιξη όσον και μετά από αυτήν, ούτως ώστε να βελτιστοποιηθούν οι μέθοδοι όρυξης και σταθεροποίησης (υποστήριξη- προϋποστήριξη), και να ελέγχεται η ασφάλεια της κατασκευής κατά την λειτουργία.

5.4 Αστικές σήραγγες

5.4.1 Διάνοιξη με πολλαπλές στοές - Η μέθοδος SCL (Sprayed Concrete Lining)

Η διάνοιξη αβαθών σηράγγων πραγματοποιείται συνήθως σε εδαφικούς χαλαρούς σχηματισμούς. Ο συνδυασμός χαμηλής ποιότητας γεωμάζας και μικρού βάθους δεν επιτρέπει την επιτυχή λειτουργία θόλου πάνω από τη διάνοιξη. Επίσης, κατά τη διάνοιξη σηράγγων στις αστικές περιοχές ο περιορισμός των καθιζήσεων είναι ύψιστης σημασίας για την αποφυγή ζημιών στις ανωδομές. Για τον περιορισμό των καθιζήσεων θα πρέπει η γεωμάζα να παραμορφώνεται όσο το δυνατό λιγότερο. Κατά συνέπεια η πρώτη από τις έξι βασικές αρχές της NATM, που αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, δεν ισχύει. Σήμερα στη Βρετανία χρησιμοποιείται και ο όρος SCL (Sprayed Concrete Lining), για να χαρακτηρίσει συμβατικές μεθόδους διάνοιξης, αβαθών αστικών σηράγγων σε μαλακά πετρώματα, με χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Η SCL όπως και η LaserShell είναι δύο πρόσφατες συμβατικές μέθοδοι εκτοξευόμενου σκυροδέματος που αναπτύχθηκαν για την αντιμετώπιση των παραπάνω προβλημάτων κατά τη διάνοιξη του μετρό του Λονδίνου.

Η SCL είναι μια μέθοδος διάνοιξης με διαδοχικές φάσεις εκσκαφής και τοποθέτησης προσωρινής επένδυσης από ψεκασμένο σκυρόδεμα με, ή χωρίς, δομικό πλέγμα, ίνες, δικτυωτά τόξα, ήλους και δοκίδες προπορείας. Οι λεπτομέρειες της άμεσης στήριξης καθορίζονται εκ των προτέρων από το μελετητή και επιβεβαιώνονται με ενόργανη παρακολούθηση. Ο έλεγχος της σύγκλισης και της καθίζησης επιτυγχάνεται κυρίως με τον περιορισμό του μήκους της προχώρησης ανά στάδιο και με τη παροχή γρήγορου κλεισίματος του αναστρόφου τόξου.

Στα σχετικά δύστροπα και ικανά στρώματα, όπως η άργιλος του Λονδίνου, η τρέχουσα πρακτική επιτρέπει γενικά την ολομέτωπη διάνοιξη σε σήραγγες με διατομή μέχρι 30 m2 εκτός αν η παρουσία υδροφόρων στρωμάτων ή η εγγύτητα των κτηρίων υπαγορεύει διαφορετικά. Κατά την προώθηση του πλήρους μετώπου υιοθετείται συνήθως μία βαθμιδωτή μηκοτομή όπως και στη NATM με μία προπορευόμενη άνω ημιδιατομή, μια ακολουθούσα βαθμίδα και ένα ανάστροφο τόξο. Η εφαρμογή της μεθόδου δύναται να πραγματοποιηθεί στις μεγαλύτερες διατομές, ανάλογα με το βαθμό συνθλιψιμότητας του πετρώματος, σύμφωνα με την αριστερή στήλη (multiple headings – πολλαπλά μέτωπα) στο Σχήμα 4 του προηγουμένου κεφαλαίου.

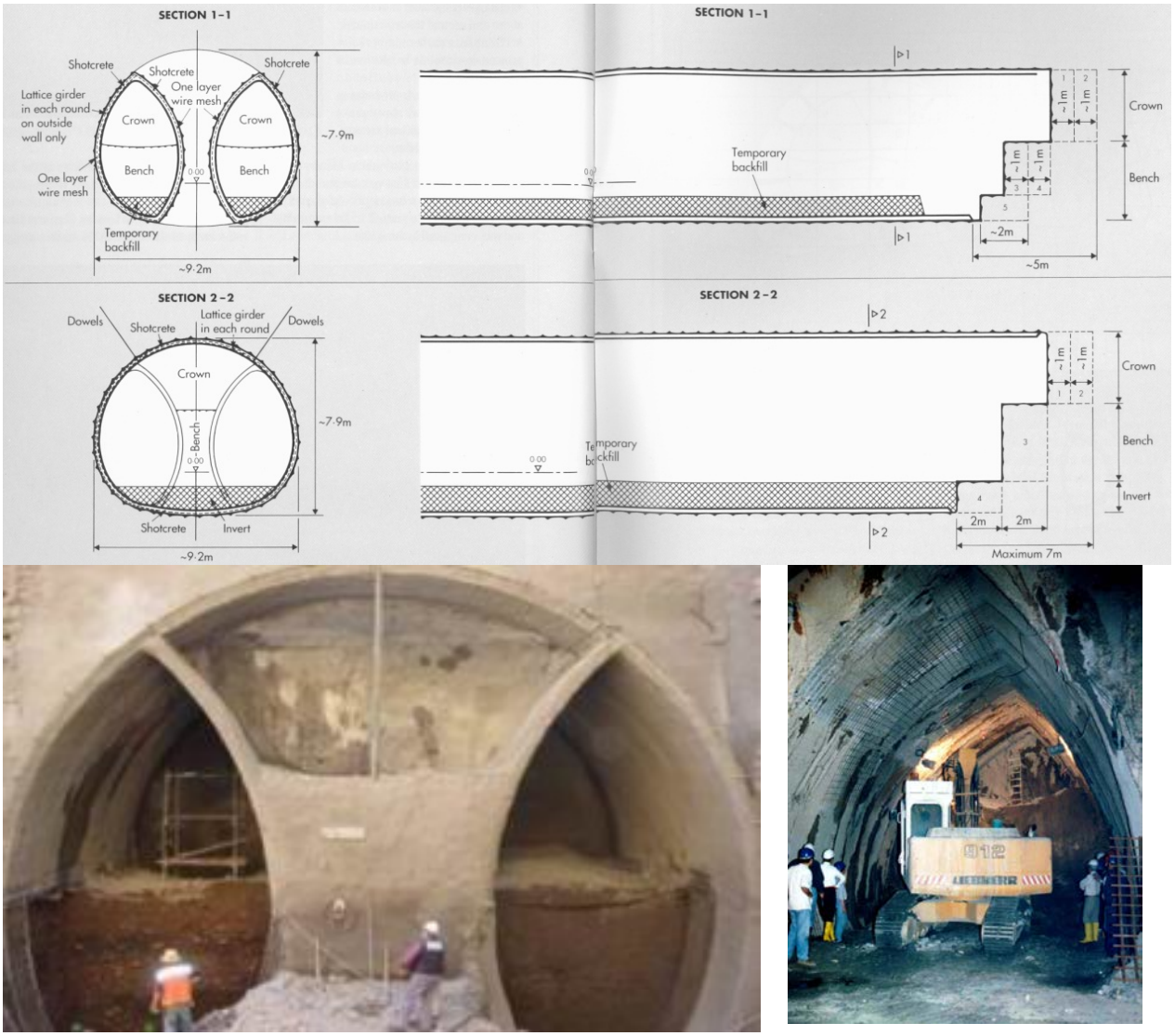
Οι μεγαλύτερες διατομές πρέπει να υποδιαιρούνται για να επιτύχουν ένα ή περισσότερους από τους ακόλουθους στόχους:

(α) μείωση της εκτεθειμένης επιφάνειας του μετώπου για τον καλύτερο έλεγχό της σταθερότητας του μετώπου, της σύγκλισης και της καθίζησης.

(β) μείωση του όγκου της εκσκαφής, του οπλισμού και του ψεκασμένου σκυροδέματος ανά βήμα προχώρησης, ώστε να παρέχεται ταχύτερα η υποστήριξη.

(γ) ταχύτερο κλείσιμο του δακτυλίου σε κάθε ένα από τα τμήματα υποδιαίρεσης του μετώπου.

Για μέτωπα εμβαδού μεγαλύτερου από 30 m2, συστήνονται τέσσερις βασικές ακολουθίες εκσκαφής όπως περιγράφονται κατωτέρω.



Σχήμα 5-23. Πάνω: Διάγραμμα φάσεων διαδοχικής διάνοιξης τύπου 1 (Sauer, 1994). Κάτω, Αριστερά: Μετρό Santiago, Δεξιά: Εφαρμογή στη διάνοιξη του σταθμού «Ακρόπολη» του Μετρό της Αθήνας (με ηλώσεις στην περιφέρεια)

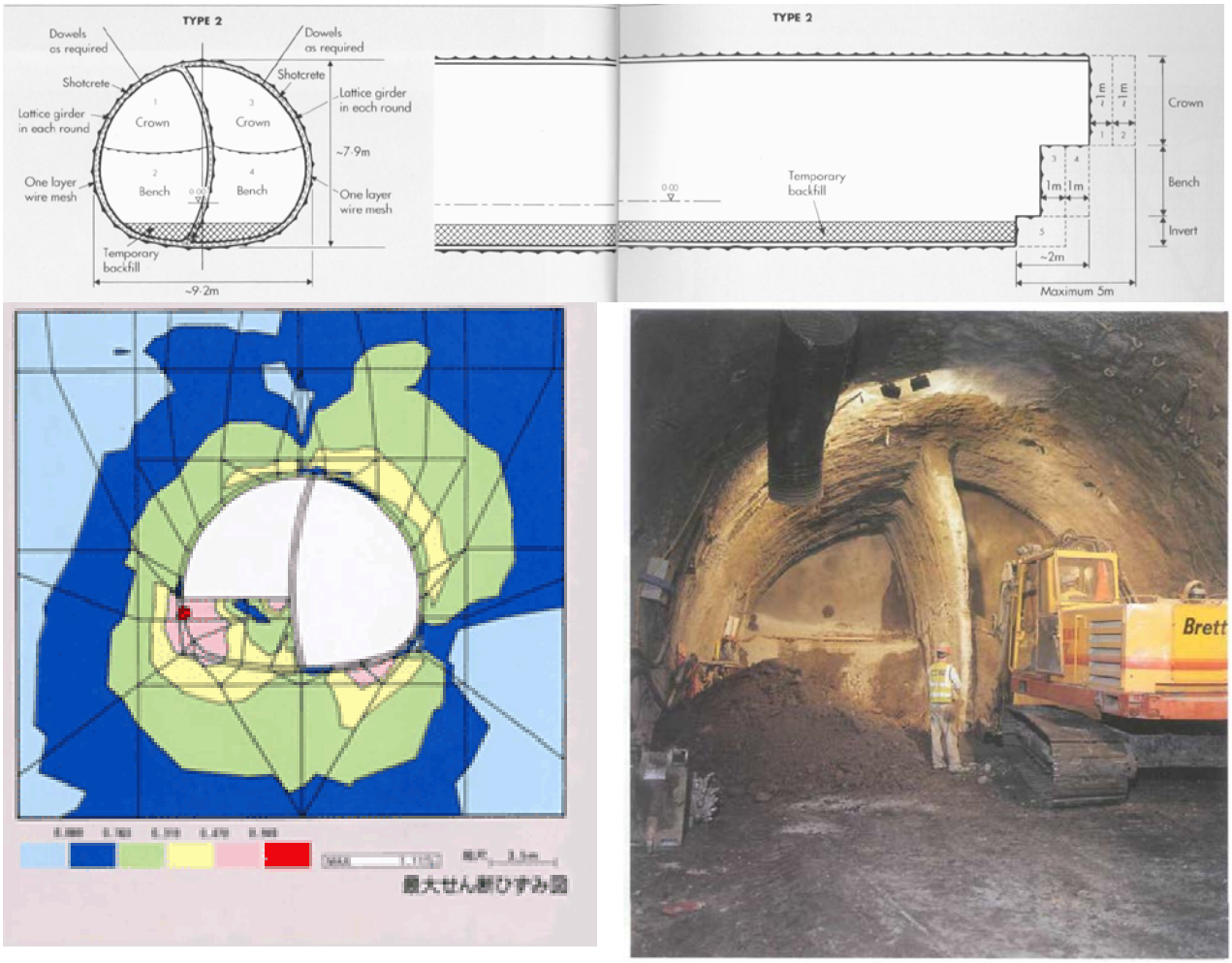
5.4.1.1 Τύπος 1.

Η μέθοδος δύναται να θεωρηθεί ως εκσυγχρονισμός της παλαιάς μεθόδου του πυρήνα. Το μέτωπο διαιρείται σε τρία μέρη, δύο πλευρικές στοές και ένα κεντρικό πυρήνα (Σχήμα 5-23). Οι πλευρικές στοές προχωρούν ταυτόχρονα, με κάθε μέτωπο να υποδιαιρείται σε άνω ημιδιατομή, βαθμίδα και ανάστροφο τόξο. Όπου απαιτείται, ο μελετητής δύναται να θέσει όρια υστέρησης της προχώρησης σε κάθε παράλληλη στοά

Τα εξωτερικά τοιχώματα των στοών ενσωματώνουν δομικό πλέγμα και δικτυωτά τόξα που βοηθούν στη, ορθή διατήρηση της μορφής. Προσωρινή επένδυση από ψεκασμένο σκυρόδεμα εφαρμόζεται στα εσωτερικά τοιχώματα των στοών και εάν δεν εγκαθίστανται τα δικτυωτά τόξα εκεί, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν οδηγοί για να επιτευχθεί το απαιτούμενο περίγραμμα.

Επιτρέποντας καθυστέρηση περίπου 25 m πίσω από τα μέτωπα των εξωτερικών στοών (για μια ονομαστική τελειωμένη διάμετρο 9 μ), το μέτωπο της κεντρικής στοάς ακολουθεί υποδιαιρεμένο πάλι ως άνω ημιδιατομή, βαθμίδα και ανάστροφο. Το ψεκασμένο σκυρόδεμα της προσωρινής επένδυσης των εσωτερικών τοιχωμάτων θραύεται, οι αρμοί καθαρίζονται, το πλέγμα και τα δικτυωτά τόξα επεκτείνονται και σκυρόδεμα ψεκάζεται για να διαμορφωθεί ο πλήρης δακτύλιος.

Τα δικτυωτά τόξα συνήθως έχουν μετωπικές συνδέσεις. Η σημασία επίτευξης συνέχειας στις συνδέσεις είναι μεγάλη, ιδιαίτερα μέσα στο ανάστροφο όπου η επιχωμάτωση μπορεί να εμποδίζει τη σωστή επιθεώρηση.



Σχήμα 5-24. Πάνω: Διάγραμμα φάσεων διαδοχικής διάνοιξης τύπου 2 (Sauer, 1994). Κάτω Αριστερά: Καταπόνηση του περιβάλλοντος πετρώματος, Δεξιά: Γραμμή Jubilee μετρό Λονδίνου (ICE, 1996)

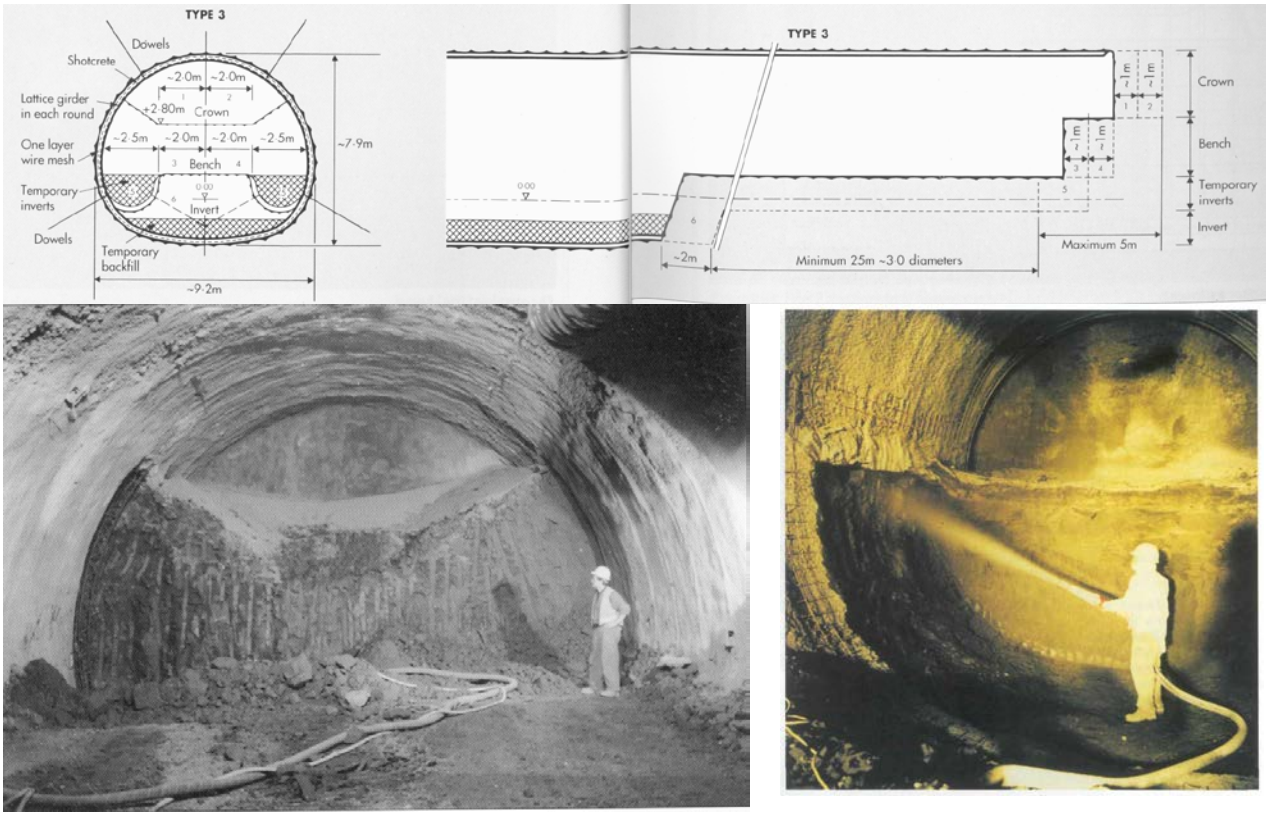
5.4.1.2 Τύπος 2.

Σε αυτή τη διαδοχική διάνοιξη, ένα προσωρινό τοίχωμα διαιρεί το μέτωπο στα δύο (Σχήμα 5-24). Κάθε μισό υποδιαιρείται σε άνω ημιδιατομή, βαθμίδα και ανάστροφο και η εκσκαφή της διεύρυνσης καθυστερεί περίπου 25 μ πίσω από τη πλευρική στοά σε μια σήραγγα ονομαστικής διαμέτρου 9 m. Πάλι, απαιτείται η διατήρηση του σωστού περιγράμματος του προσωρινού τοιχώματος. Με την προχώρηση της διεύρυνσης, το κεντρικό τοίχωμα θραύεται, το πλέγμα και το δικτυωτό τόξο εγκαθίσταται και ψεκασμένο σκυρόδεμα εφαρμόζεται για την ολοκλήρωση του δακτυλίου. Πρόσθετη προσοχή πρέπει να δίνεται ώστε να εξασφαλίζεται η σωστή κατασκευή του αρμού στο ανάστροφο, σύμφωνα με τη μελέτη.

5.4.1.3 Τύπος 3.

Αυτή η διαδοχική διαδικασία, που είναι πιο κατάλληλη για μαλακό βράχο απ' ότι για την άργιλο, αρχίζει με μία κεντρική στοά στέψης που ακολουθείται αμέσως από την εκσκαφή της βαθμίδας στο πλήρες πλάτος της. Την προχώρηση κάθε επιμέρους τμήματος ακολουθεί η εγκατάσταση δομικού πλέγματος και δικτυωτών τόξων και ο ψεκασμός με σκυρόδεμα. Το τοίχωμα διευρύνεται στη βάση της βαθμίδας ώστε να παρέχεται στήριξη στο τόξο της στέψης, και μπορεί να ενσωματώνει πέλματα των

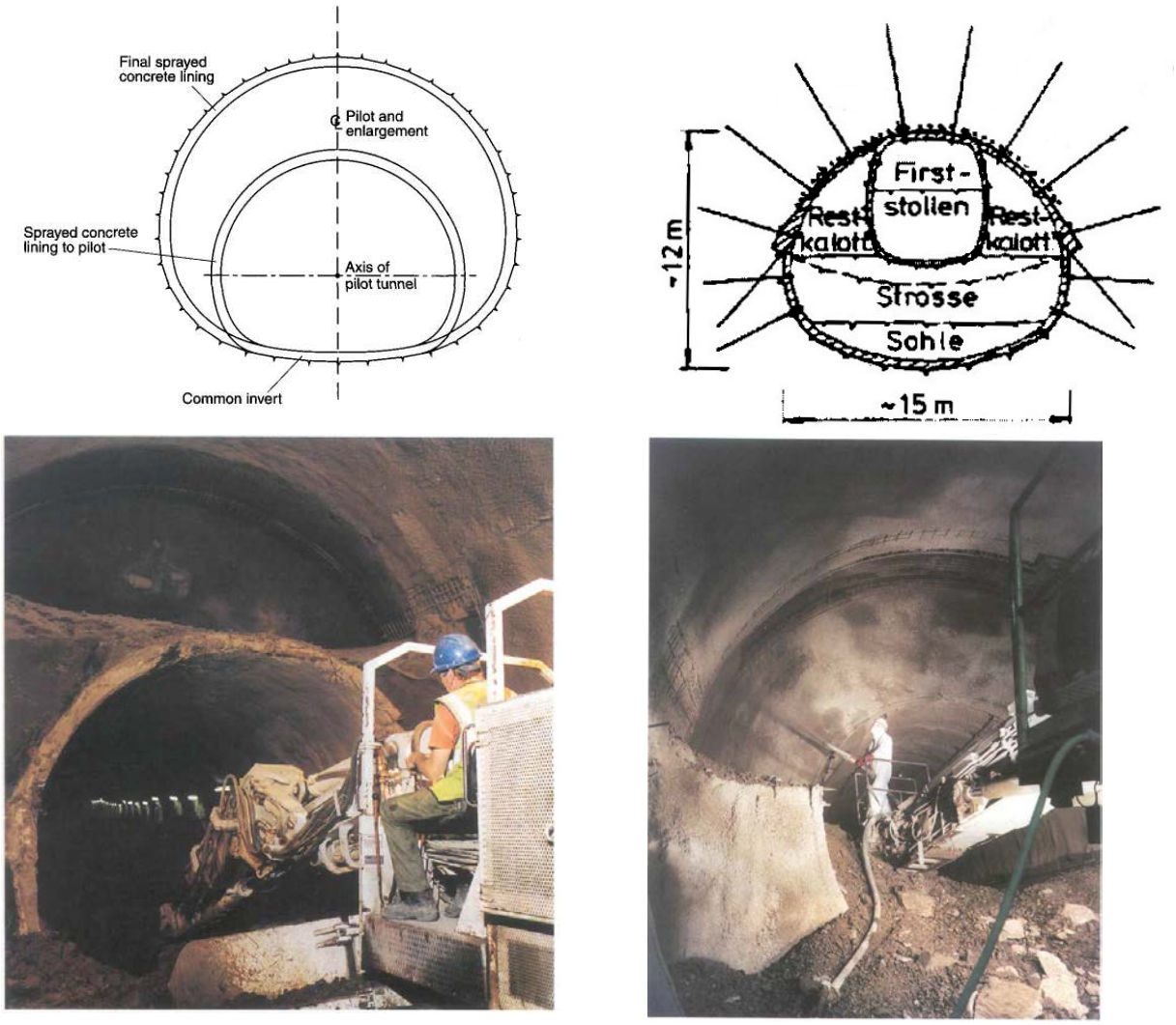
δικτυωτών τόξων ώστε να διατηρείται επαρκής υποστήριξη της αψίδας κατά τη διάρκεια της επόμενης εκσκαφής του ανάστροφου (Σχήμα 5-25).



Σχήμα 5-25. Πάνω: Διάγραμμα φάσεων διαδοχικής διάνοιξης τύπου 3 (Sauer, 1994). Κάτω αριστερά:Heathrow express rail link, Δεξιά: Επέκταση της γραμμής Jubilee του μετρό Λονδίνου (ICE, 1996)

5.4.1.4 Τύπος 4.

Η διαδοχική αυτή διάνοιξη ξεκινάει με την ολομέτωπη προχώρηση μιας κυκλικής ή περίπου κυκλικής στοάς οδηγού, που ακολουθείται αργότερα από τη διεύρυνση στο πλήρες μέγεθος της σήραγγας. Η οδηγός στοά μπορεί να είναι περίπου ομόκεντρος ή μπορεί να μοιράζεται ένα κοινό ανάστροφο τόξο με την σήραγγα διεύρυνσης, έτσι ώστε το ανάστροφο της οδηγού να διατηρείται και να ενσωματώνεται στην επένδυση της διεύρυνσης (Σχήμα 5-26). Τα κύρια πλεονεκτήματα τέτοιων στοών οδηγών είναι: η ευκολία διάνοιξής τους στη χάραξη της σήραγγας, η αποφυγή των αρμών στο ανάστροφο τόξο, και η δράση βλήτρου της οδηγού στοάς που μειώνει την απώλεια όγκου κατά τη διεύρυνση. Διαφορετική μέθοδος με προπορευόμενη διάνοιξη στοάς προπορείας στη στέψη και υποθεμελίωση της επένδυσης, εφαρμόσθηκε στη διάνοιξη της σήραγγας Schulwald (Maidl, 2004)



Σχήμα 5-26. Πάνω αριστερά: Διαδοχική διάνοιξη τύπου 4, με στοά προπορείας και διεύρυνση. Κάτω αριστερά και δεξιά:: Επέκταση της γραμμής Jubilee του Μετρό Λονδίνου (ICE, 1996). Πάνω δεξιά: Άλλη μέθοδος με προπορευόμενη στοά στη στέψη (Maidl, 2004).

5.4.1.5 Διασταυρώσεις

Οι σήραγγες στη διαδρομή τους συναντώνται με άλλα υπόγεια δομήματα, και η σαφής κατανόηση της διαμόρφωσης των τομών τους είναι σημαντική για την ασφαλή και οικονομική κατασκευή των συνδέσεων των διατομών. Στις περισσότερες περιστάσεις, παρέχεται μονολιθική σύνδεση των δομημάτων στη συνάντησή τους, μολονότι υπάρχουν περιπτώσεις όπου απαιτείται η παροχή δυνατότητας σχετικής μετακίνησης. Οι μέθοδοι κατασκευής πρέπει να προσαρμόζονται ώστε να καλύπτουν τις απαιτήσεις της μελέτης.

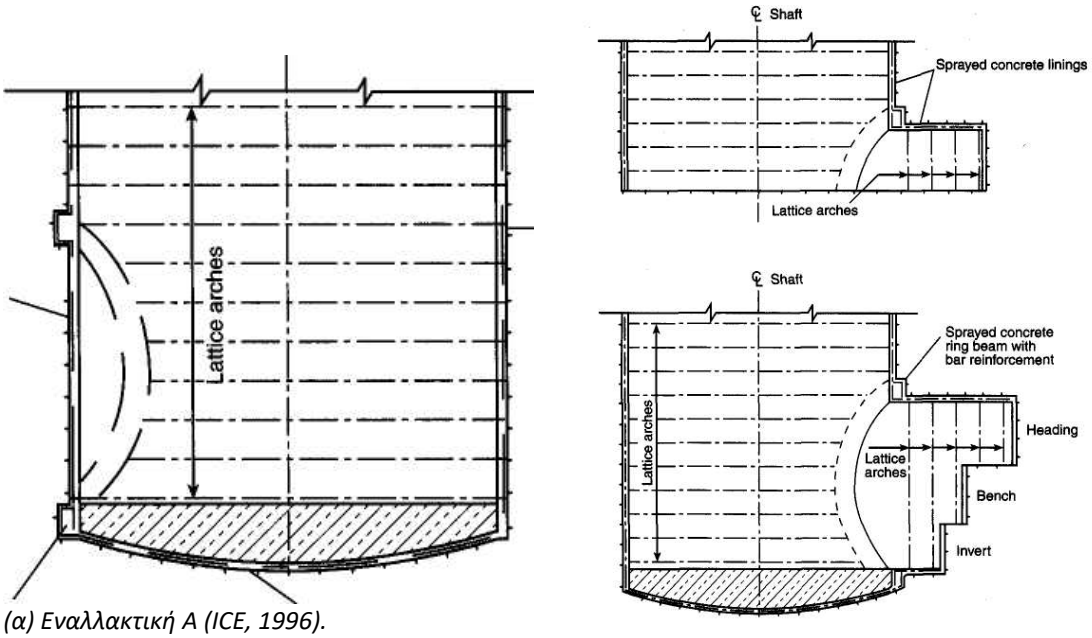
5.4.1.5.1 Διασταυρώσεις με φρέατα

Διαθέσιμες είναι διάφορες εναλλακτικές μέθοδοι, εκ των οποίων οι πιο κοινές παραλλαγές είναι οι παρακάτω Α και Β.

Εναλλακτική Α (Σχήμα 5-27α). Κατά τη βύθιση του φρέατος, διαμορφώνεται σταδιακά κυκλική δοκός από οπλισμένο ψεκασμένο σκυρόδεμα, με τον άξονα οριζόντιο, μέσα στην επένδυση του φρέατος. Το μάτι που δημιουργείται από ψεκασμένο σκυρόδεμα εντός του δακτυλίου της δοκού, θραύεται κατά τη διέλευση της σήραγγας.

Εναλλακτική Β (Σχήμα 5-27β). Όπως και η εναλλακτική Α παραπάνω, αλλά αρχίζει η εκσκαφή και στήριξη της άνω ημιδιατομής της σήραγγας ταυτόχρονα με τη βύθιση του φρέατος σε εκείνο το επίπεδο. Ομοίως, προχωρεί και στηρίζεται η βαθμίδα και στη συνέχεια το ανάστροφο της σήραγγας καθώς

βυθίζεται σταδιακά το φρέαρ. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να υπερνικήσει με επιτυχία τα προβλήματα πρόσβασης, αλλά επιβάλει πρόσθετο φορτίο στην κυκλική δοκό προτού κατασκευαστεί πλήρως.



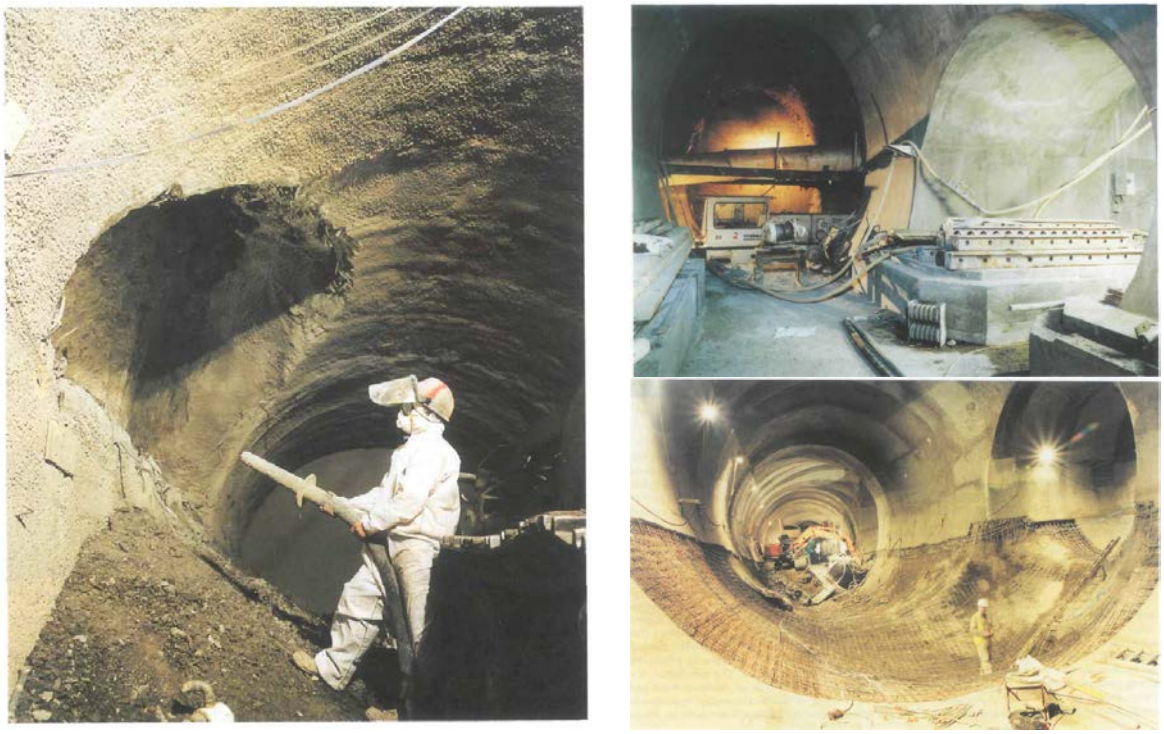
(α) Εναλλακτική Α (ICE, 1996).

(β) Εναλλακτική Β

Σχήμα 5-27. Διασταύρωση φρέατος-σήραγγας (ICE, 1996).

5.4.1.5.2 Διασταυρώσεις σηράγγων (Σχήμα 5-28)

Στις διασταυρώσεις, γενικά η μεγαλύτερη διατομή κατασκευάζεται πρώτη. Κατά τη διάνοιξη, τα δικτυωτά τόξα πρέπει να τοποθετούνται προσεκτικά για να ταιριάζουν στη διασταύρωση.



Σχήμα 5-28. Αριστερά: Απλοποίηση της διάνοιξης σε διασταύρωση. Πάνω δεξιά: Heathrow express. Σιδηροδρομική σήραγγα και σύνδεση εξαερισμού με αρχικές επενδύσεις SCL. Κάτω δεξιά: Σήραγγα αποσκευών Heathrow. Προετοιμασία για την τελική επένδυση πάνω στην αρχική επένδυση σε διασταύρωση (ICE, 1996).

5.4.2 Ολομέτωπη διάνοιξη - Μέθοδος LaserShell (Eddie & Newmann, 2005)

Η μέθοδος Laser Shell στοχεύει στην αντιμετώπιση αφενός των κινδύνων που υφίστανται για τους εργαζομένους πλησίον του μετώπου, ιδιαίτερα όταν αυτό είναι σημαντικών διαστάσεων και ανυποστήρικτο, αφετέρου των αναγκών για ταχύτερη και οικονομικότερη πραγματοποίηση της διάνοιξης. Αναπτύχθηκε από τους δύο αναδόχους του έργου στον τερματικό σταθμό 5 του Heathrow, τη βρετανική Morgan Est. και την αυστριακή Beton und Monierbau.

5.4.2.1 Χαρακτηριστικά της μεθόδου

Η παραδοσιακές μέθοδοι σηραγγοποιίας οι οποίες χρησιμοποιούν επενδύσεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος, προϋποθέτουν την χρήση χαλύβδινων δικτυωτών πλαισίων προκειμένου να διασφαλιστεί ο έλεγχος των διαστάσεων της διατομής στο μέτωπο, αλλά και της ορθότητας της γεωμετρίας της επένδυσης. Πέραν τούτου τα πλαίσια αυτά παρέχουν έναν μηχανισμό για την σταθεροποίηση των δομικών πλεγμάτων κατά την κατασκευή της προσωρινής επένδυσης. Η διαδικασία τοποθέτησης των πλαισίων και των πλεγμάτων σε συνδυασμό με τους απαραίτητους ελέγχους ορθότητας της γεωμετρίας της διατομής, απαιτεί την παρουσία του προσωπικού πολύ κοντά στο ανυποστήρικτο μέτωπο θέτοντας το σε υψηλό κίνδυνο.

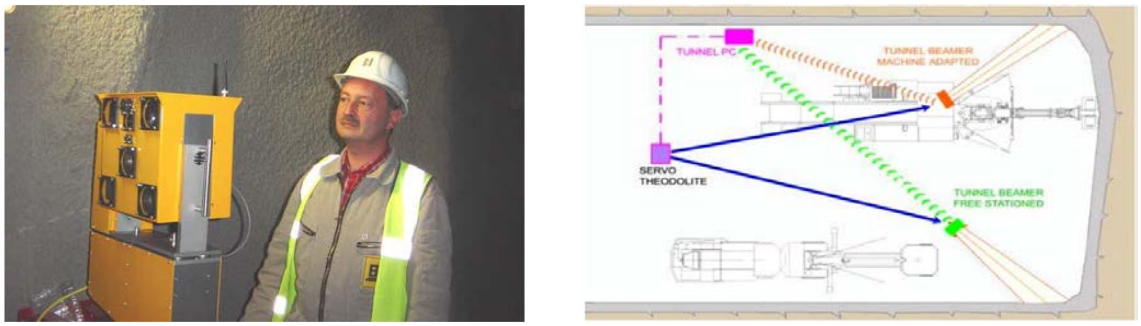
Προκειμένου να εξαλειφθεί ο κίνδυνος αυτός αναπτύχθηκε μία μέθοδος η οποία παρέχει την δυνατότητα ελέγχου της μορφής, των διαστάσεων και της θέσης της επένδυσης από απόσταση. Τούτο απαιτεί εξοπλισμό που να είναι κατάλληλος προς χρήση σε υπόγεια έργα τόσον σε ελεύθερη τοποθέτηση όσον και σε μηχανήματα εκσκαφής και ψεκασμού σκυροδέματος, να επιτρέπει χειρισμό σε πραγματικό χρόνο με καταγραφή των δεδομένων των ολοκληρωμένων εργασιών για λόγους ελέγχου και διασφάλισης της ποιότητας αυτών, και ευκρινή προβολή των πληροφοριών με φιλική προς τον χρήστη λειτουργία.

Η μέθοδος επίσης αποτρέπει τη χρησιμοποίηση πλαισίων. Η απουσία των δικτυωτών πλαισίων συνεπάγεται την απουσία ενός φυσικού μηχανισμού ελέγχου της διατομής αλλά και του προσανατολισμού της εκσκαφής (Δημακόπουλος, 2008). Το σύστημα Tunnel Beamer αποτελείται από μία συστοιχία σκοπεύτρων laser τα οποία λειτουργούν κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να υπάρχει ακριβής οπτικός προσδιορισμός της θέσης του μετώπου της εκσκαφής και των ανεπένδυτων και επενδυμένων τοιχωμάτων της υπό κατασκευή σήραγγας (Σχήμα 5-29). Κατάλληλο θεοδόλιχο το οποίο χρησιμοποιεί σερβομηχανισμό για την σκόπευση του, χρησιμοποιείται για τον προσανατολισμό του Tunnel Beamer στις τρεις διαστάσεις, προκειμένου να είναι δυνατή η συσχέτιση των δεδομένων που εξάγονται από την συσκευή με τις θεωρητικές συντεταγμένες της εκσκαφής και της επένδυσης. Οι πληροφορίες μέτρησης οι οποίες συλλέγονται, διαβιβάζονται με συνεχή ροή σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, ευρισκόμενο στο χώρο της εκσκαφής, ο οποίος περιέχει όλα τα δεδομένα σχετικά με τον προσανατολισμό της σήραγγας και διεξάγει συνεχή σύγκριση της πραγματικής με την θεωρητική θέση του μετώπου. Τα αποτελέσματα από τη σύγκριση αυτή προβάλλονται συνεχώς στην οθόνη του υπολογιστή του χειριστή (



Σχήμα 5-30).

Η τεχνολογία αυτή του Tunnel Beamer, αναπτύχθηκε για τις ανάγκες της μεθόδου Laser Shell, η οποία υιοθετεί την όρυξη του μετώπου υπό μορφή κεκλιμένου θόλου, προς όφελος της ευστάθειας της εκσκαφής και της ασφάλειας των εργαζόμενων στο έργο. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί ο αριθμός των αρμών από την κατασκευή και να αυξηθεί ο ρυθμός προχώρησης, προτείνεται η διάνοιξη αβαθών έργων σε υπερστερεοποιημένη άργιλο με ολομέτωπη εκσκαφή για διαμέτρους μέχρι 6.5 μέτρα. Για διατομές μεγαλύτερης διαμέτρου προτείνεται η διάνοιξη μόνον της στοάς προπορείας με ολομέτωπη εκσκαφή.



Συσκευή Tunnel Beamer *Εξάρτηση από θεοδόλιχο*

Σχήμα 5-29. Tunnel Beamer και εξάρτησή του από θεοδόλιχο

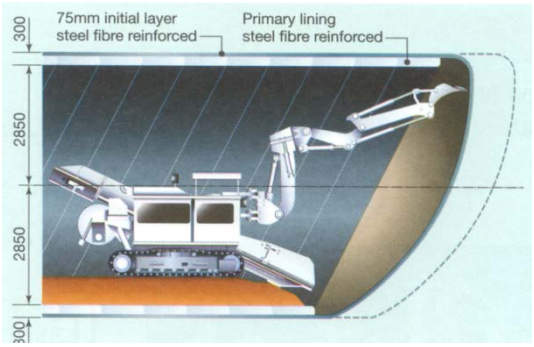


Σχήμα 5-30. Λειτουργία συσκευής Tunnel Beamer κατά την εκσκαφή Συνεχής καταγραφή και συσχέτιση με την επιδιωκόμενη διατομή

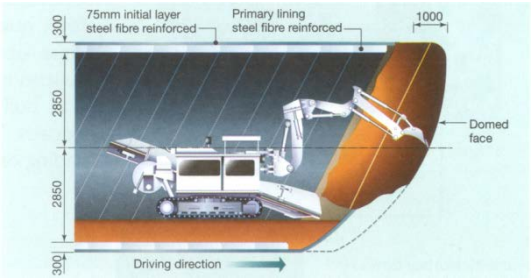
5.4.2.2 Πλεονεκτήματα της μεθόδου

Όπως αναφέρεται παραπάνω, ο κύριος στόχος της μεθόδου είναι να εξαλείψει τους κινδύνους που απορρέουν από την έκθεση του προσωπικού στο ανυποστήρικτο μέτωπο. Πέραν τούτου, προκύπτουν πολλά ενδιάμεσα πλεονεκτήματα από την εφαρμογή της μεθόδου Laser Shell εκ των οποίων τα κυριότερα περιγράφονται παρακάτω:

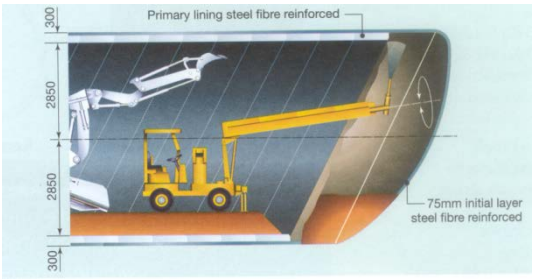
- Μικρός χρόνος κλεισίματος του ανάστροφου τόξου και συνεπώς απομείωση των καθιζήσεων.
- Κεκλιμένο μέτωπο, το οποίο περιορίζει τις καθιζήσεις.
- Εξάλειψη προβλημάτων που προκύπτουν από την χρήση δικτυωτών χαλύβδινων πλαισίων.
- Μείωση κόστους κατασκευής, κόστους υλικών και κόστους που σχετίζεται με τον χρόνο εκτέλεσης των εργασιών.
- Μείωση χρόνου ολοκλήρωσης της κατασκευής με συνεπακόλουθη μείωση των καθιζήσεων.
- Ολικός έλεγχος ποιότητας της μορφής της επένδυσης, των διαστάσεων αυτής και της θέσης της.



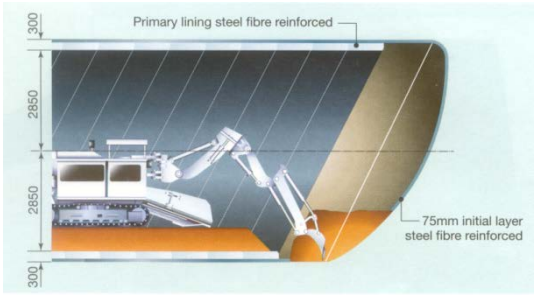
Στάδιο πρώτο- έναρξη εκσκαφής



Στάδιο δεύτερο-εκσκαφή του άνω τμήματος του μετώπου σε ποσοστό 70%



Στάδιο 3-ψεκασμός 75mm εκτοξευόμενου σκυροδέματος στο 70% του μετώπου



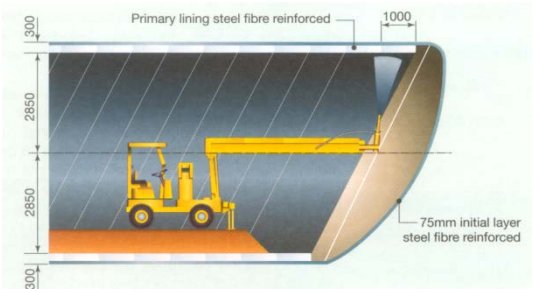
Στάδιο 4- εκσκαφή του ανάστροφου τόξου



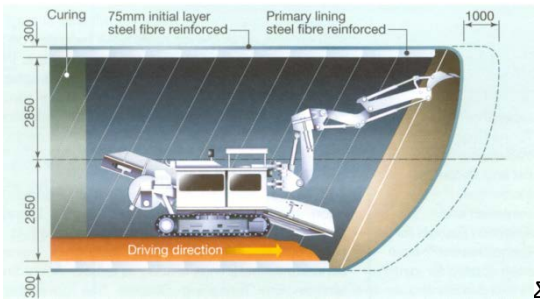
Στάδιο 5-ψεκασμός 75mm εκτοξευόμενου σκυροδέματος στο ανάστροφο τόξο



Ψεκασμός ελεγχόμενος από το Tunnel Beamer



Στάδιο 6- ψεκασμός 200 έως 250mm εκτοξευόμενου σκυροδέματος



Στάδιο 7- τοποθέτηση υποβάθρου αδρανών και επανάληψη σταδίων 1 έως 6

Σχήμα 5-31. Στάδια της μεθόδου Laser Shell

Εκτιμήσεις σχετικά με τον κόστος και τον χρόνο κατασκευής, έδειξαν ότι συγκριτικά με τις προϋπάρχουσες μεθόδους οι οποίες εφαρμόζουν επενδύσεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι δυνατό να επιτευχθεί, σε συγκεκριμένες περιπτώσεις, σημαντική οικονομία. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι ο συμβατικός τρόπος διάνοιξης ο οποίος εκτελείται σε τρία στάδια, δηλαδή εκσκαφή στέψης, εκσκαφή κύριας βαθμίδας, και ακολούθως ανάστροφου τόξου, αντικαθίσταται από την εκσκαφή σε ένα στάδιο –για περιπτώσεις διατομών διαμέτρου μέχρι 6,5 μέτρα. Όσον αφορά στις διανοίξεις μεγαλύτερων διατομών, οι οικονομικότητα της μεθόδου έγκειται στην απουσία των δικτυωτών χαλύβδινων πλαισίων και δομικού πλέγματος, καθώς και στην απουσία προσωρινών τοιχωμάτων.

5.4.2.3 Περιγραφή επένδυσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος μονού κελύφους

Τα στάδια διάνοιξης της μεθόδου φαίνονται στο Σχήμα 5-31. Η επένδυση μονού κελύφους της σήραγγας, κατασκευάζεται σε τρία στάδια σε κάθε ένα από τα οποία τοποθετείται από μία στρώση.

5.4.2.3.1 Αρχική στρώση

Μία στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος οπλισμένη με ίνες χάλυβα και πολυπροπυλενίου, πάχους 75 mm, τοποθετείται συστηματικά στην περιοχή του μετώπου, άμεσα μετά το πέρας των εργασιών εκσκαφής. Η τοποθέτηση της στρώσης αυτής έχει ως στόχο να:

- Βελτιώσει την ασφάλεια του εργαζόμενου προσωπικού
- Βελτιώσει την ευστάθεια του ανοίγματος και συνεπώς να μειώσει τις καθιζήσεις

- Δημιουργήσει ένα φυσικό εμπόδιο το οποίο θα λειτουργεί προστατευτικά για την κύρια στρώση αποτρέποντας φαινόμενα προσβολής θειικών και χλωριόντων

Η αρχική στρώση δεν συνυπολογίζεται στον καθορισμό της φέρουσας ικανότητας της επένδυσης.

5.4.2.3.2Κύρια στρώση

Η κύρια στρώση τοποθετείται αμέσως μετά την ολοκλήρωση της αρχικής στρώσης (επιβάλλεται ως μέγιστο μήκος προχώρησης για κάθε κύκλο διάνοιξης το 1 μέτρο). Το μίγμα σκυροδέματος που χρησιμοποιείται για την στρώση αυτή οπλίζεται με χαλύβδινες ίνες υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα προς περιορισμό της ψαθυρής συμπεριφοράς αυτού μετά την πήξη. Η στρώση αυτή θεωρείται ότι παραλαμβάνει το σύνολο των φορτίων και διαστασιολογείται ανάλογα. Επίσης το σκυρόδεμα οπλίζεται με ίνες πολυπροπυλενίου, οι οποίες αυξάνουν την ανοχή σε μικρορωγματώσεις και βελτιώνουν την πυρίμαχη συμπεριφορά του υλικού.

5.4.2.3.3Τελική στρώση

Μετά την ολοκλήρωση των εργασιών διάνοιξης της σήραγγας, απομακρύνεται το προσωρινό υπόβαθρο αδρανών, και η εξωτερική επιφάνεια της κύριας στρώσης καθαρίζεται επιμελώς με πεπιεσμένο αέρα και νερό. Ακολούθως ψεκάζεται η τελική στρώση ελάχιστου πάχους 50 mm και η εξωτερική της επιφάνεια τελειοποιείται, χειρονακτικά, προκειμένου να εξομαλυνθεί. Η τελική στρώση, όπως και η αρχική δεν σχεδιάζεται ως φέρον στοιχείο της επένδυσης. Λειτουργεί ως πυροπροστασία για την κύρια στρώση καθώς και ως επίχρισμα το οποίο προσδίδει μια ομαλή επιφάνεια στην επένδυση. Το μίγμα της στρώσης αυτής δεν περιέχει χαλύβδινες ίνες παρά μόνον ίνες πολυπροπυλενίου.

Βιβλιογραφία

Barla G (1995). "Squeezing rocks in tunnels", ISRM News Journal, Vol 2, No 3&4, pp 44-49

Barton N & Grimstad E (1994). "Rock mass conditions dictate the choice between NMT and NATM", *Tunnels &Tunnelling*, Oct., Vol. 26, 39-42.

Barton N (2002). Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. Volume 39, Issue 2, February 2002, Pages 185-216.

Broms BB and Bennermark H (1967). "Stability of clay at vertical openings", J. of the Geotechnical division, 3.

Chern JC, Yu CW, and Shiao FY (1998). "Tunnelling in squeezing ground and support estimation." *Proc. Reg. Symp. Sedimentary Rock Engineering,* Taipei, 192-202.

Δημακόπουλος Α. (2008). «Διάνοιξη σήραγγας με κεκλιμένο μέτωπο και συνεχή παρακολούθηση», Διπλωματική εργασία, Σχολή ΜΜΜ, ΕΜΠ.

Deere DU, Peck RB, Parker HW, Monsees JE and Schmidt B (1970). "Design of Tunnel Support Systems: Highway Res. Rec. No. 339:26-33.

ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ ΑΕ (2003). «Οδηγίες Σύνταξης Μελετών Έργων Οδοποιίας. Παρ. 6.1, Αναθεώρηση Α3».

ΕΛΟΤ (2009). ΤΠ 1501-12-02-01-01 «Tunnel excavation with conventional means – Υπόγεια εκσκαφή σηράγγων με συμβατικά μέσα»

Eddie C and Newmann C (2005). "Sprayed advances – LaserShell update", TT International, September, 48-49.

Goel RK, Jethwa JL, Paithankar AG (1995). Indian Experiences with Q and RMR Systems Tunnelling and Underground space Technology, Vol 10, No 1, pp 97- 109. 1995

Health and Safety Executive (HSE) (1996). "Safety of New Austrian Tunnelling Method (NATM) Tunnels, A review of sprayed concrete tunnels with particular reference to London Clay", (HSE) Books, Sudbury, 80p.

Heuer (1974). "Important ground parameters in soft ground tunneling", Proc. Specialty Conf. on Subsurface Exploration, for Underground Excavation and Heavy Construction, NY, ASCE.

Hoek E (2001). "Big tunnels in bad rock", 2000 Terzaghi Lecture Seattle, ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127, 9, 726-740.

Hoek E (2010). "Tunnels in weak rock", Ch. 12 in Practical rock engineering, http://www.rockscience.com

Hoek E and Marinos P (2000). "Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses", , Tunnels and Tunnelling International, Part 1 – November, Part 2 – December.

ICE (1996). "Sprayed concrete linings for tunnels in soft ground", Design and practice guide, Thomas Telford.

Kovári K (1993). "Erroneous Concepts behind NATM", Rabcewicz-Geomechanical Colloquium in Salzburg, October 14. (same in Tunnels & Tunnelling, November 1994, Vol. 26, 38-42.)

Lunardi P (2000). "The design and construction of tunnels using the approach based on the Analysis of COntrolled DEformation in Rocks and Soils (ADECO-RS)", T&T International, May.

Maidl B (2004). "Handbuch des Tunnel- und Stollenbaus", Band I, ch. 4, 3 Auflage, Verlag Glückauf.

Maidl B, Thewes M, Maidl U (2013). "Handbook of Tunnel Engineering, Vol. I", Ernst & Sohn.

Monsees JE (1996). "Soft ground tunneling", in Bickel JO, Kuesel TR and King EH, eds. "Tunnel Engineering Handbook", Ch. 6, I.T.P.

Muller L - Salzburg (1978) “Der Felsbau, Dritter Band : Tunnelbau, ch. 16.55”, Enke.

Pacher F (1964). “Deformationsmessungen im Versuchsstollen als Mittel zur Erforschung des Gebirgsvehaltens und zur Bemessung des Ausbaus”, Rock Mechanics 1, 149.

Peck RB (1969). “Deep Excavations and tunneling in soft ground”, State of the art volume, 7th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundations, Mexico City.

Peck RB, Hendron AJ & Mohraz B (1972). “State of the Art of Soft-tunnelling”, Proceedings of the first North American Rapid Excavation and Tunnelling Conference, 259-86, Chicago, ASCE, AIME.

Rabcewicz LV (1964). “The new Austrian tunnelling method”, Water Power, Part 1 November, Part 2 December, and Part 3 January 1965.

Sakurai S (1983). “Displacement measurements associated with the design of underground openings”, Proc., Int. Symp. Field Measurements in Geomechanics, Zurich, 2, 1163–1178.

Sauer G (1994). Reprints courtesy of *Tunnels and Tunnelling* and *World Tunnelling*.

Singh B and Goel RK (2006). “Tunnelling in weak rocks, ch. 9 & 19”, Elsevier

Singh B, Goel RK (1999). “Rock Mass Classification. A practical approach in rock engineering”, Elsevier.

Sofianos A.I., Katsaris D., Giannaros Ch. and Kalkantzi A (1999). “Variability in the construction of the soft rock Patra highway deviation tunnels” Challenges for the 21st Century - Proc. of the World Tunnel Congress ’99, Oslo, June, pp. 433-39, Balkema..

Τζάμος ΣΧ (2008). «Εκτίμηση της υποστήριξης υπόγειων έργων με εφαρμογή τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης », Διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ.

Tatiya R (2005). “Civil excavations and tunnelling, ch. 7”, Thomas Telford.

Terzaghi K (1950). ”Geologic aspects of soft ground tunneling”, Ch. 11 in Applied sedimentation, R. Task & D. Parker, eds, NY, John Wiley and Sons.

Vavrovsky G.M. 1995. NATM: Geomechanical principles explained, Tunnels & Tunnelling, October 1995, Vol. 27, 31-34.

Whittaker BN and Frith RC (1990). “Tunnelling-Design, Stability and Construction, ch. 6 & 15”, IMM

Κριτήρια αξιολόγησης

Κριτήριο αξιολόγησης 1

α. Σε τι διαφέρει η SCL από την NATM.
β. Σε τι διαφέρει η NATM από την ADECO-RS
γ. Δώστε τους τέσσερις τύπους διάνοιξης της SCL
δ. Ποιοι είναι οι δύο βασικοί στόχοι της LaserShell.
ε. Ποια τα επτά στάδια της μεθόδου Lasershell μονού κελύφους.

Απάντηση/Λύση

Κριτήριο Αξιολόγησης 2

Σήραγγα αυτοκινητοδρόμου 26Τ διανοίγεται σε γεωλογικούς σχηματισμούς στους οποίους αναμένεται μεγάλη σύνθλιψη. Η απόσταση μεταξύ των γραμμών Α και Β είναι 200mm. Το πάχος της μεμβράνης και οι τεχνικές ατέλειες είναι 5cm και το πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος 25 cm . Η μόνιμη επένδυση είναι 40cm.
(i) Η εκσκαφή πραγματοποιείται με πολλαπλές διανοίξεις. Σχεδιάστε τη διατομή και τις φάσεις εκσκαφής της σήραγγας, καθώς και τα μέτρα άμεσης υποστήριξης. Επιλέξτε το μηχανολογικό εξοπλισμό.
(ii) Η εκσκαφή πραγματοποιείται σε δύο φάσεις, άνω ημιδιατομή και αναβαθμός. Σχεδιάστε τη διατομή και τις φάσεις εκσκαφής της σήραγγας, καθώς και τα μέτρα άμεσης υποστήριξης. Επιλέξτε το μηχανολογικό εξοπλισμό.
(iii) Η εκσκαφή πραγματοποιείται ολομέτωπα. Σχεδιάστε τη διατομή εκσκαφής της σήραγγας, καθώς και τα μέτρα άμεσης υποστήριξης. Επιλέξτε το μηχανολογικό εξοπλισμό.

Απάντηση/Λύση

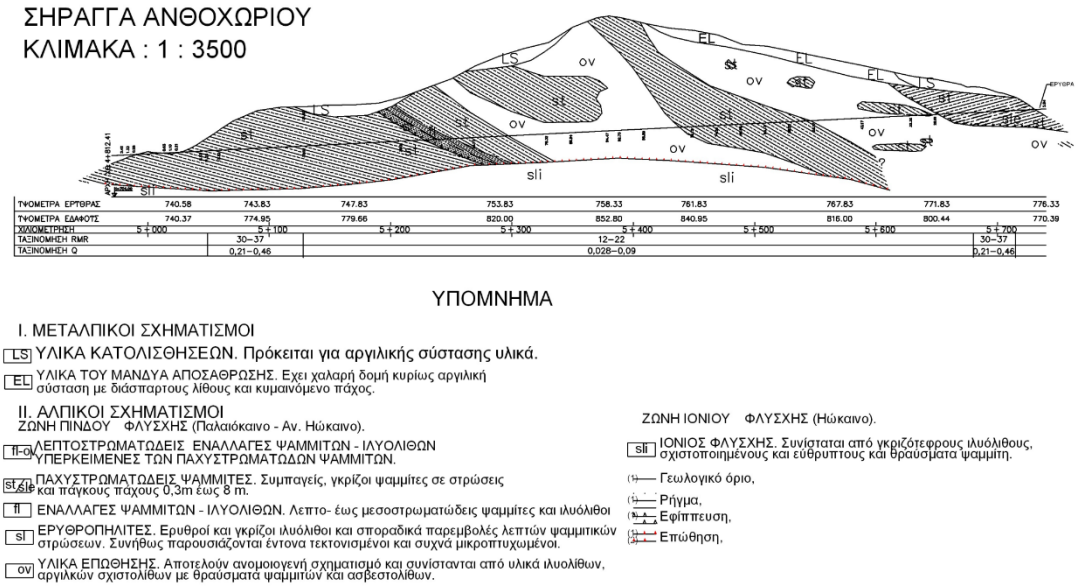
Κριτήριο αξιολόγησης 3

Σήραγγα μετρό διανοίγεται με την SCL. Η άμεση υποστήριξη αποτελείται από εκτοξευμένο σκυρόδεμα πάχους 250mm. Η απόσταση μεταξύ των γραμμών Α και Β είναι 100mm.
(i) Η διάνοιξη είναι τύπου 2. Σχεδιάστε την εγκάρσια τομή και μηκοτομή της εκσκαφής της σήραγγας, καθώς και τα μέτρα άμεσης υποστήριξης. Επιλέξτε το μηχανολογικό εξοπλισμό.
(ii) Η εκσκαφή είναι τύπου 3. Σχεδιάστε την εγκάρσια τομή και μηκοτομή της εκσκαφής της σήραγγας, καθώς και τα μέτρα άμεσης υποστήριξης. Επιλέξτε το μηχανολογικό εξοπλισμό.

Απάντηση/Λύση

Θέμα. Διάνοιξη ορεινής σήραγγας με μηχανικά μέσα

Στο τμήμα της Εγνατίας Οδού (ΕΟ) από τη Χ.Θ. 5+042,10 έως τη Χ.Θ. 5+717,40, κατασκευάζεται σήραγγα μήκους 675m. Η τυπική διατομή των σηράγγων της ΕΟ δίνεται από την άσκηση του προηγουμένου κεφαλαίου. Με βάση τα αποτελέσματα των γεωλογικών και γεωτεχνικών ερευνών εκτιμήθηκαν οι τεχνικογεωλογικές συνθήκες κατά μήκος της εν λόγω σήραγγας (Σχήμα 5-32). Ειδικότερα, κατά τη διάνοιξη, στο μεγαλύτερο τμήμα της αναμένεται να συναντηθούν τα υλικά της επώθησης και οι παχυστρωματώδεις ψαμμίτες του Πινδικού φλύσχη.



Σχήμα 5-32. Μηκοτομή σήραγγας

Το πλέον χαρακτηριστικό τεκτονικό γνώρισμα της περιοχής είναι η μεγάλη επώθηση του Πινδικού φλύσχη πάνω στον Ιόνιο. Η σήραγγα θα διανοιχτεί στο μεγαλύτερο τμήμα της στα υλικά της βάσης της επώθησης, ενώ ένα μικρότερο τμήμα της θα διανοιχτεί στους σχηματισμούς των ερυθροπηλιτών, των εναλλαγών και των παχυστρωματωδών ψαμμιτών του Πινδικού φλύσχη.

Στα πρώτα 290m περίπου από την είσοδο, η σήραγγα διανοίγεται κυρίως σε παχυστρωματώδεις ψαμμίτες (~270m) και σε ένα μικρότερο τμήμα σε ερυθροπηλίτες (~10m) και εναλλαγές ψαμμιτών και ιλυολίθων (~10m). Τα ψαμμιτικά στρώματα έχουν σχετικά μικρό πάχος (μέχρι 2m περίπου) και παρουσιάζουν μέτριο και τοπικά έντονο τεκτονισμό και αποσάθρωση. Οι ιλυολιθικές ενστρώσεις, που παρεμβάλλονται σχεδόν πάντα μεταξύ των ψαμμιτικών πάγκων, έχουν πάχος που κυμαίνεται από λίγα χιλιοστά έως μερικά εκατοστά. Σπανιότερα παρατηρήθηκαν στην ευρύτερη περιοχή της σήραγγας και ιλυολιθικές ζώνες μεγαλύτερου πάχους. Ο προσανατολισμός των ψαμμιτικών στρωμάτων είναι ΒΔ-ΝΑ. Η κλίση των ψαμμιτικών στρωμάτων κυμαίνεται από 27^{o} έως 48^{o}. Η παράταξη των στρωμάτων τέμνει τον άξονα των σηράγγων με πολύ μικρή γωνία, που δεν ξεπερνάει τις 15^{o}. Αναλυτικά, η στρώση παρουσιάζει γεωμετρικά στοιχεία Β:33^{o}/041^{o}, επιφάνειες επίπεδες και παρεμβολές ιλυολιθικών στρωμάτων μικρού πάχους. Εκτός από τη στρώση μετρήθηκαν τρία κύρια συστήματα διακλάσεων J1:64^{o}/303^{o}, J2:69^{o}/248^{o} και J3:70^{o}/113^{o}. Τα συστήματα J1, J2, J3 σε γενικές γραμμές περιλαμβάνουν διακλάσεις κλειστές, μικρού μήκους, με τραχείες και ελαφρά αποσαθρωμένες επιφάνειες.

Στο μεσαίο τμήμα της σήραγγας μήκους 320m περίπου, συναντάται το πιο φτωχό σε μηχανικές ιδιότητες πέτρωμα λόγω της έντονης τεκτονικής καταπόνησης και μυλωνιτίωσης που έχει υποστεί. Πρόκειται για τα υλικά της επώθησης. Αποτελούνται από μια χαοτική μάζα γκριζοπράσινων και ερυθρών κατακερματισμένων ιλυολίθων με τεμάχια ψαμμιτών και ασβεστολίθων διαφόρων διαστάσεων. Δίνουν την εικόνα ενός στερεοποιημένου χαλαρού σχηματισμού που κατά τη διάτρησή του δίνει υψηλές τιμές RQD. Τα ψαμμιτικά και ασβεστολιθικά βραχώδη τεμάχια που παρεμβάλλονται στην ιλυολιθική κύρια μάζα (matrix), προέρχονται από μετακινήσεις μεγαλυτέρων τεμαχών στη φάση της επώθησης του Πινδικού φλύσχη πάνω στον Ιόνιο.

Στο τελευταίο προς την έξοδο τμήμα της σήραγγας μήκους 80m περίπου, συναντάται η ψαμμιτική φάση του Πινδικού φλύσχη με διεύθυνση στρωμάτων ΝΔ-ΒΑ (αντίρροπες προς το φυσικό πρανές). Η κλίση των στρωμάτων κυμαίνεται από 38^{o} έως 54^{o}. Η παράταξη των στρωμάτων τέμνει τον άξονα της σήραγγας με γωνία της τάξεως των 30^{o}. Αναλυτικά, η στρώση παρουσιάζει στοιχεία Β:47^{o}/339^{o}, μεγάλο μήκος, άνοιγμα<0.01mm, τραχείες και μέτρια αποσαθρωμένες επιφάνειες. Εκτός από τη στρώση μετρήθηκαν και τρία κύρια συστήματα διακλάσεων J1:72^{o}/138^{o}, J2:85^{o}/202^{o} και J3:73^{o}/251^{o}. Τα συστήματα J1, J2, J3 σε γενικές γραμμές περιλαμβάνουν διακλάσεις κλειστές, μικρού σχετικά μήκους, με τραχείες και ελαφρά αποσαθρωμένες επιφάνειες. Πρόκειται για γκρίζους και τοπικά γκριζοκάστανους, παχυστρωματώδεις ψαμμίτες με ιλυολιθικές ενδιαστρώσεις, υγιείς έως μέτρια αποσαθρωμένους, με μέτριο τεκτονισμό και παρουσία ζωνών διάτμησης. Το πάχος της επιφανειακής ζώνης αποσάθρωσης στον ψαμμίτη είναι μικρό και δεν υπερβαίνει τα 2-3m. Ο βαθμός αποσάθρωσης όμως επεκτείνεται κατά μήκος των τεκτονικών ασυνεχειών, όπου εξαιτίας της έντονης αποσάθρωσης σχηματίζονται ζώνες σημαντικού εύρους μέχρι 30-40cm πληρωμένες με αργιλοαμμώδες υλικό. Το εύρος των εν λόγω ζωνών μειώνεται με το βάθος προοδευτικά.

Ο ψαμμιτικός σχηματισμός συνίσταται σε γκριζόχρωμους, λεπτόκοκκους παχυστρωματώδεις ψαμμίτες, υγιείς έως ελαφρά αποσαθρωμένους και μέτρια έως έντονα τεκτονισμένους. Ο ρυθμός προχώρησης των γεωτρήσεων στον εν λόγω σχηματισμό κρίνεται ικανοποιητικός (~6,0 m/ημέρα) η δε πυρηνοληψία (TCR) προσέγγισε το 100%. Ο δείκτης RQD παρουσίασε σχετικά χαμηλή μέση τιμή περί το 50%, ενδεικτική του έντονου τεκτονισμού. Από δείγματα που ελήφθησαν από τους πυρήνες των γεωτρήσεων προσδιορίστηκε εργαστηριακά η πυκνότητα του ψαμμιτικού σχηματισμού ίση προς 2.70Mg/m^{3} (μέση τιμή πέντε δοκιμών). Δέκα (10) δοκιμές μοναξονικής θλίψης υπέδειξαν σχηματισμό "μέτρια ισχυρό" (κατά B.S. 5930) δίνοντας μέση τιμή αντοχής (σ_{ci}) ίση προς 50MPa. Οκτώ (8) δοκιμές αντοχής σε εφελκυσμό (Brazilian test) υπέδειξαν μέση τιμή αντοχής (σ_{ti}) ίση προς 3.8MPa. Δέκα επτά (17) διαμετρικές δοκιμές σημειακής φόρτισης έδωσαν μέσο όρο δείκτη (Is(50)) ίσο προς 2.5MPa. Οι ψαμμίτες είναι έντονα τεκτονισμένοι, διατηρούν όμως σημαντικές αντοχές σε εφελκυσμό και θλίψη. Στις ψαμμιτικές στρώσεις, παρεμβάλλονται ιλυολιθικές ζώνες, μικρού πάχους, οι οποίες λειτουργούν σαν υλικά λίπανσης στις επιφάνειες της στρώσης με αποτέλεσμα κατά μήκος των επιφανειών αυτών να παρατηρούνται πολλές φορές ολισθήσεις.

Τα υλικά επώθησης αποτελούν μια χαοτική μάζα γκριζοπράσινων και ερυθρών κατακερματισμένων ιλυολίθων με τεμάχια ψαμμιτών και ασβεστολίθων διαφόρων διαστάσεων. Ο ρυθμός προχώρησης των γεωτρήσεων στον εν λόγω σχηματισμό κρίνεται ικανοποιητικός (6~7 m/ημέρα) η δε πυρηνοληψία (TCR) προσέγγισε το 100%. Αντιπροσωπευτικές τιμές RQD των πυρήνων είναι της τάξεως του 40~50%. Από δείγματα που ελήφθησαν από τους πυρήνες των γεωτρήσεων προσδιορίστηκε εργαστηριακά η πυκνότητα των υλικών επώθησης, για την ψαμμιτική αλλά και την ιλυολιθική φάση. Οι μέσες τιμές πυκνότητας που ελήφθησαν είναι ίσες προς 2.5 (8 δοκιμές) και 2.4Mg/m^{3} (4 δοκιμές). Ένδεκα (11) δοκιμές μοναξονικής θλίψης υπέδειξαν σχηματισμό "μέτρια ισχυρό" (κατά B.S. 5930) δίνοντας μέση τιμή αντοχής (σ_{ci}) ίση προς 26 MPa, για την ψαμμιτική φάση. Για την ιλυολιθική φάση η αντίστοιχη μέση τιμή βρέθηκε μικρότερη και ίση προς 22MPa. Ένδεκα (11) δοκιμές αντοχής σε εφελκυσμό (Brazilian test) υπέδειξαν μέση τιμή αντοχής (σ_{ti}) ίση προς 3.4MPa, για την ψαμμιτική φάση. Τριάντα τρείς (33) διαμετρικές δοκιμές σημειακής φόρτισης έδωσαν μέσους όρους δείκτη (Is(50)) ίσους προς 1.5 και 0.3MPa για την ψαμμιτική και την ιλυολιθική φάση ενώ τρείς (3) δοκιμές αξονικής σημειακής φόρτισης έδωσαν μέσους όρους δείκτη (Is(50)) ίσους προς 2.4 και 2.9MPa, αντίστοιχα. Οι σαφώς χαμηλότερες τιμές αντοχών που προσδιορίστηκαν για την ψαμμιτική και την ιλυολιθική φάση των υλικών επώθησης οφείλονται στον έντονο τεκτονισμό. Αναμένονται γενικά πτωχά γεωμηχανικά χαρακτηριστικά βραχομάζας στα υλικά της επώθησης και ιδιαιτέρως σε θέσεις επικράτησης της ιλυολιθικής φάσης.

Αναφορικά με τις επικρατούσες υδρογεωλογικές συνθήκες στη στενή περιοχή των μετώπων εισόδου δεν διαπιστώθηκαν πηγές ενώ η οποιαδήποτε εμφάνιση νερού στα ψαμμιτικά πετρώματα του λεπιωμένου Πινδικού φλύσχη θα εξαρτάται άμεσα από τις μετεωρικές συνθήκες. Στη σήραγγα τα εντοπιζόμενα νερά (στάθμες πιεζομέτρων) θα έχουν τη μορφή υγρασίας ή σταγόνων, ενώ κατά μήκος τεκτονικών ασυνεχειών θα υπάρχει ενδεχόμενα συνεχής ροή. Στις περιοχές όπου επιφανειακά παρατηρήθηκαν κατολισθητικά φαινόμενα είναι πιθανόν να υπάρχουν κατεισδύσεις νερών μέχρι το βάθος της σήραγγας μέσω ανοιχτών διακλάσεων της ψαμμιτικής βραχομάζας. Τα υλικά της επώθησης λόγω της αργιλικής πηλιτικής σύστασης αναμένεται να είναι σε γενικές γραμμές στεγνά. Τέλος στην περιοχή των μετώπων εξόδου η ψαμμιτική βραχομάζα αποστραγγίζεται στο επίπεδο της κοίτης της παρακείμενης μισγάγκειας και κατά μήκος του μετώπου της εσωτερικής λεπίωσης, σε απόλυτα υψόμετρα μικρότερα από τα αντίστοιχα της

ερυθράς της οδού. Συνεπώς, ο ρόλος του νερού στη διαμόρφωση των μετώπων εξόδου θα είναι κατά βάση αμελητέος. Στην ψαμμιτική βραχομάζα όπου ο συντελεστής κατείσδυσης είναι υψηλός δεν αναμένονται εμφανίσεις υδάτων και επιφανειακά δεν διαπιστώθηκαν πηγές. Υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας αναμένεται αρκετά βαθύτερα από το ύψος της ερυθράς καθώς εκτιμάται ότι η ευρύτερη περιοχή αποστραγγίζεται σε χαμηλότερα σημεία, στην κοίτη του Μετσοβίτικου.

ΖΗΤΟΥΜΕΝΑ

1. Η θέση έναρξης και πέρατος της σήραγγας, λαμβάνοντας υπόψη ότι το υπερκείμενο πέτρωμα πρέπει να έχει ύψος τουλάχιστον 3 μέτρα.

2. Η εκτίμηση των συνθηκών ευστάθειας της σήραγγας στις 2 περιοχές διαφορετικής ποιότητας πετρώματος από τις οποίες διέρχεται η σήραγγα. Η αντοχή της βραχομάζας σ_c εκτιμήθηκε σε 0.7 MPa για τις περιοχές όπου ο δείκτης RMR λαμβάνει τιμές 30-37 και 0.5 MPa για την περιοχή όπου ο δείκτης RMR λαμβάνει τιμές μεταξύ 12-22.

3. Ο καθορισμός της τεχνικής όρυξης σε κάθε τμήμα.

4. Το είδος του μηχανολογικού εξοπλισμού που θα χρησιμοποιηθεί.

Απάντηση/Λύση

Κεφάλαιο 6

Σύνοψη
Στα στόμια των σηράγγων συναντάται το υπόγειο με το επίγειο τμήμα του έργου. Οι περιοχές αυτές κατασκευάζονται με συμβατικές μεθόδους διάνοιξης, που εξαρτώνται από τις γεωτεχνικές συνθήκες. Η διαμόρφωση των στομίων εξαρτάται επίσης από το ανάγλυφο της περιοχής . Αναπτύσσονται οι μέθοδοι σχεδιασμού των στομίων. Εμπέδωση επιτυγχάνεται με παραδείγματα και ασκήσεις.

Προαπαιτούμενη γνώση
Μαθήματα: Μηχανική των πετρωμάτων. Εδαφομηχανική. Χρήσιμη βιβλιογραφία: Müller (1978), *Norwegian Design Guide (1990).*

6. Στόμια σηράγγων

6.1 Γενικά

Τα στόμια της σήραγγας αποτελούν το πιο εμφανές τμήμα της και χαρακτηρίζουν τη μορφή της. Κατά το σχεδιασμό, καλούνται να μελετηθούν προβλήματα που αφορούν ιδιαιτερότητες τους στη λειτουργία, στην κατασκευή και στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η διαμόρφωσή τους πρέπει να εξυπηρετεί μια σειρά από τεχνικές λειτουργίες, όπως προστασία του δρόμου από καταπτώσεις βράχων ή χιονοστιβάδων καθώς και από τη ροή νερού, ευστάθεια έναντι κατολίσθησης των παρακειμένων πρανών, ασφάλεια έναντι σεισμού και πυρκαγιάς, μετάβαση από την ανοικτοσύνη της υπαίθρου στην κλεισούρα μιας τεχνητά φωτισμένης σήραγγας και αντιστρόφως χωρίς τη δημιουργία προβλημάτων ορατότητας οδήγησης, οδική ασφάλεια, στεγανότητα, κλπ. Η κατασκευή τους, λόγω δυσμενών γεωτεχνικών συνθηκών και ανάγλυφου, αντιμετωπίζει συχνά δυσκολίες. Τέλος, πολύ σημαντική είναι η απαίτηση για αισθητική εναρμόνισή τους με το περιβάλλον. Ο σχεδιασμός των στομίων άλλοτε επιδιώκει την απόκρυψη τους και άλλοτε την εμφανή παρουσία τους. Στην πρώτη περίπτωση επιδιώκεται η αποκατάσταση της αρχικής μορφής του τοπίου, όπως π.χ. στο τμήμα της σιδηροδρομικής σύνδεσης Ρώμης – Φλωρεντίας, που φαίνεται στο Σχήμα 6-1α, με μορφή στομίων σηράγγων προσαρμοσμένη στο ανάγλυφο του τοπίου, ώστε να κρύβεται κατά το δυνατόν η κατασκευή. Στη δεύτερη περίπτωση η είσοδος αναδεικνύεται ως έργο γλυπτικής, όπως για παράδειγμα το στόμιο του Neutor Σχήμα 6-1β στο Salzburg.

Στο στόμιο μιας σήραγγας ανήκουν το προ-όρυγμα με τα μέτρα στήριξης των πρανών που δημιουργούνται από την εκσκαφή και το μέτωπο με την πύλη εισόδου της σήραγγας. Τα μέτρα προστασίας συχνά είναι τοιχία ή πασσαλότοιχοι από σκυρόδεμα Η διαμόρφωση του στομίου εξαρτάται: α) από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του έργου όπως η χάραξή του (οδός, υδαταγωγός, κλπ) και η μορφολογία της περιοχής, β) από τις τοπικές και ευρύτερες γεωλογικές συνθήκες όπως οι γεωλογικοί σχηματισμοί, η ύπαρξη ενεργών κατολισθήσεων, ο τεκτονισμός, η ύπαρξη νερών, η ενεργότητα των ρηγμάτων, κλπ κίνδυνοι, γ) από τη δυνατότητα μόρφωσης κατάλληλων φορέων αντιστήριξης, δ) από τη λειτουργικότητα του στομίου και τους περιορισμούς από την ύπαρξη άλλων δομημάτων ή έργων υποδομής, και ε) από τις επιπτώσεις στο περιβάλλον και τους σχετικούς περιορισμούς.



(α) Αισθητική εναρμόνιση σιδηροδρόμου και σηράγγων με το περιβάλλον FE.S.P.I. (1992).



(β) Σήραγγα Neutor, Salzburg

Σχήμα 6-1. Αισθητική εναρμόνιση με το περιβάλλον

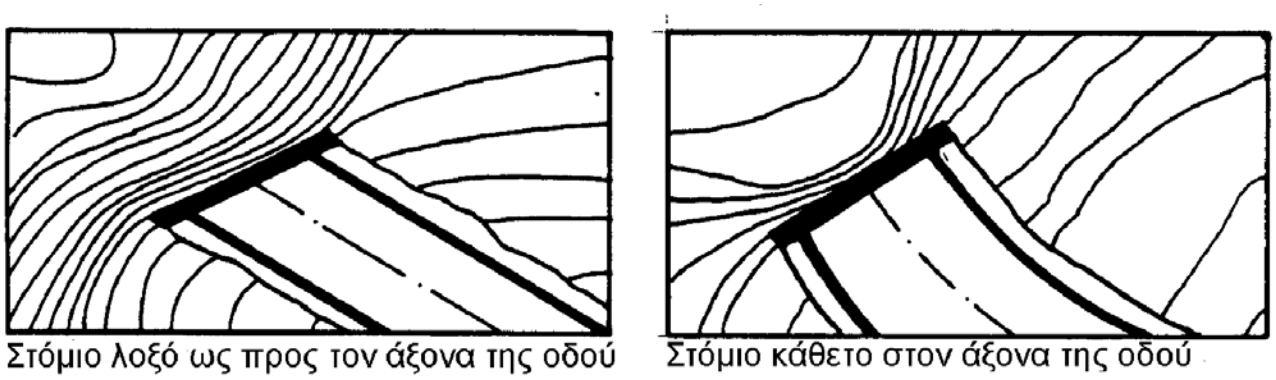
6.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του έργου

6.2.1 Μορφολογία της περιοχής

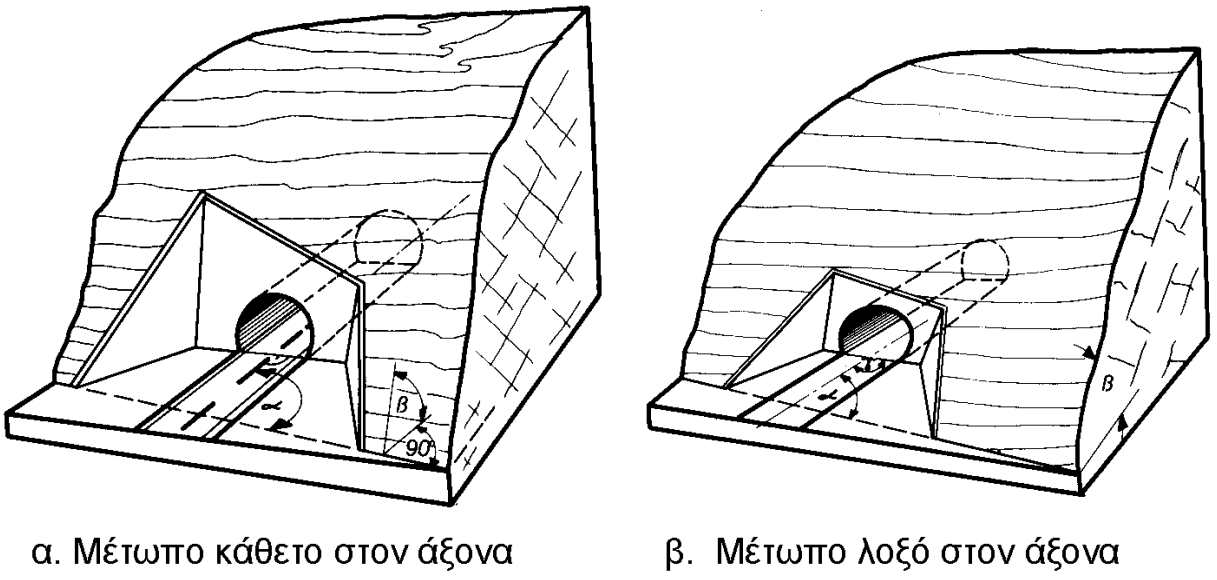
Οι δυσκολίες στη διάνοιξη συνήθως συναρτώνται με το επικλινές ανάγλυφο της περιοχής και τη θέση του στομίου σε σχέση με τον άξονα της χάραξης. Εφόσον αυτά είναι δυσμενή, οι απαιτούμενες εκσκαφές δύνανται να έχουν ιδιαίτερα μεγάλο όγκο, μεγάλες κλίσεις τεχνητών πρανών, και να είναι ασύμμετρες ως προς τον άξονα της οδού. Εφόσον μάλιστα οι υφιστάμενοι γεωλογικοί σχηματισμοί είναι ασθενείς και υπάρχουν υπόγεια νερά, οι δυσκολίες διαμόρφωσης των στομίων επιτείνονται. Δημιουργούνται έτσι καταστάσεις στις οποίες μικρά λάθη μπορούν να οδηγήσουν σε μεγάλες επιπτώσεις. Σύμφωνα με τα παραπάνω οι δυσκολίες κατασκευής των στομίων αυξάνουν:

- με τον όγκο του ορύγματος, του οποίου η εκσκαφή διαταράσσει την ισορροπία του πρανούς
- με το ύψος και την κλίση των πρανών του ορύγματος, δεδομένου μάλιστα ότι αυξάνει και η πιθανότητα συνάντησης ασθενών ζωνών με την αύξηση του ύψους.
- με την ασυμμετρία του ορύγματος, που δυσκολεύει δυσανάλογα τη δυνατότητα ανάληψης των ωθήσεων του εδάφους και τη σταθεροποίηση του πρανούς.

Είναι φανερό ότι οι δυσκολίες ελαχιστοποιούνται όταν η χάραξη του έργου (οδός, σιδηρόδρομος, υδαταγωγός, κλπ) τέμνει κάθετα (Σχήμα 6-2) την παράταξη του πρανούς. Τότε ο όγκος εκσκαφής και το ύψος των πρανών του ορύγματος παραμένουν τα ελάχιστα και η μορφή της εκσκαφής είναι περίπου συμμετρική (Σχήμα 6-3α). Με την προσαρμογή του μετωπικού πρανούς στο ανάγλυφο του τοπίου, ιδιαίτερα σε απόκρημνα πρανή, βελτιώνονται περαιτέρω τα χαρακτηριστικά του ορύγματος (Σχήμα 6-3β). Για μικρές κλίσεις φυσικών πρανών δεν είναι ιδιαίτερης σημασίας οι δυσκολίες λόγω ασυμμετρίας. Αντίθετα, για υψηλές κλίσεις πρανών, όπου είναι ιδιαίτερα σημαντική η δράση των προαναφερθέντων παραγόντων, είναι ιδιαίτερα δύσκολο να επιτευχθεί η διαμόρφωση μιας χάραξης που θα τέμνει κάθετα το πρανές, εκτός αν η χάραξη διέρχεται από μία γέφυρα.



Σχήμα 6-2. Χάραξη που προσπίπτει σχεδόν κάθετα σε απότομο πρανές. Αριστερά: Προσαρμογή του μετώπου στο πρανές. Δεξιά: Μέτωπο κάθετο στη χάραξη της οδού.



Σχήμα 6-3. Ανάπτυξη τοιχίων για σχεδόν κάθετη πρόσπτωση της χάραξης σε απότομο πρανές (Müller, 1978)

Εφόσον όμως η χάραξη αναπτύσσεται επάνω στο φυσικό πρανές, τότε η τομή της με το έδαφος θα πραγματοποιείται υπό οξεία γωνία (Σχήμα 6-4). Σε αυτήν την περίπτωση, προκειμένου να επιτευχθεί η ελάχιστη κάλυψη πάνω από τη στέψη του κλάδου της σήραγγας, θα δημιουργούνται απόκρημνα υψηλά πρανή (Σχήμα 6-5α). Με την προσαρμογή του μετωπικού πρανούς στο ανάγλυφο του τοπίου, βελτιώνονται τα χαρακτηριστικά του ορύγματος (Σχήμα 6-5β). Παρόλα αυτά, με μια λοξή πρόσπτωση, τόσον το κόστος όσον και οι δυσκολίες αυξάνουν σημαντικά. Τίθεται επομένως, σε μια τέτοια περίπτωση, το ερώτημα ποια είναι η απαιτούμενη κάλυψη πάνω από τη στέψη. Ασφαλώς, απόκρημνα ορύγματα με ύψος υπερκειμένων 10m πάνω από τη στέψη είναι αντιαισθητικά, ενέχουν προβλήματα αστάθειας στο χρόνο, και βραχοπτώσεων. Οι σύγχρονες δυνατότητες άμεσης υποστήριξης ή και προϋποστήριξης, δίνουν τη δυνατότητα μείωσης των εκσκαφών με τράβηγμα του μετώπου έναρξης του υπόγειου έργου προς τα έξω (Σχήμα 6-6). Εκτός αυτού, με την προσαρμογή στην τοπογραφία και ιδιαίτερα με την καμπύλωση των τοιχίων επιτυγχάνεται περαιτέρω μείωση του ύψους των πρανών.

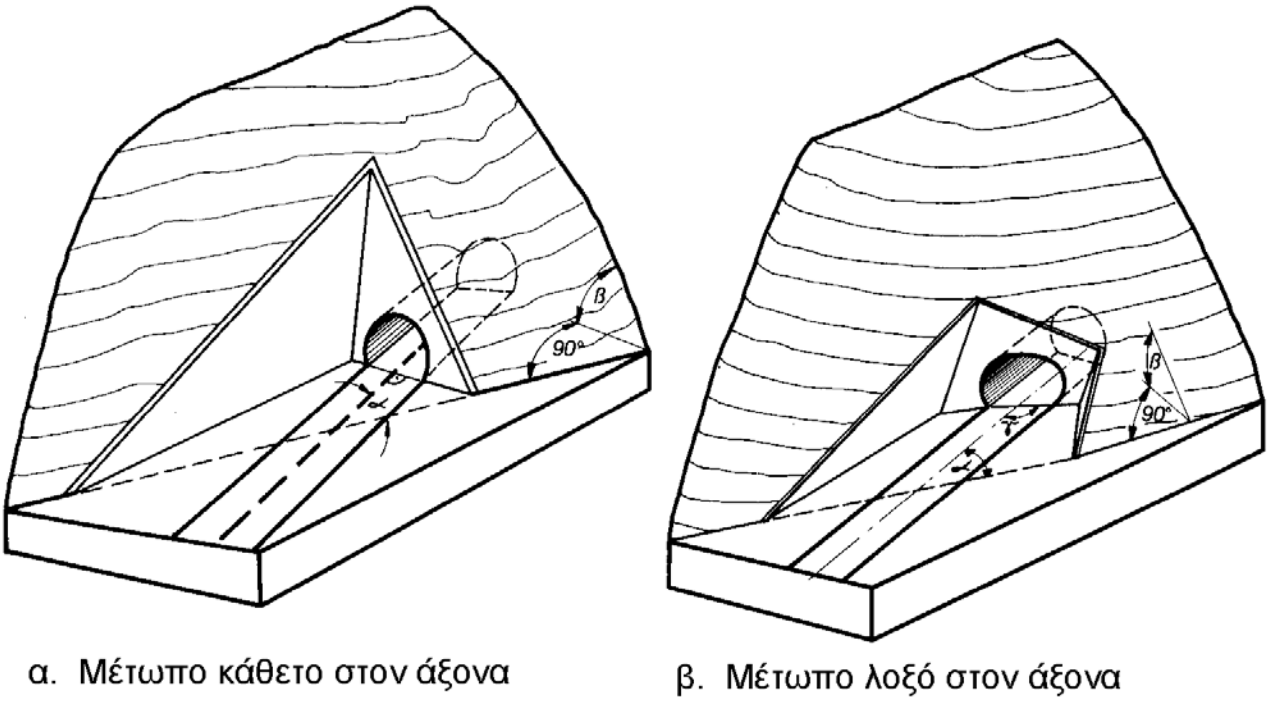


(α) Λοξή πρόσπτωση δίδυμης οδικής σήραγγας Strenger στην Αυστρία. (2x5.8km μήκος, 77-88m² διατομή, 620m μέγιστο υπερκείμενο, 69 μήνες 2000-2007, διάτρηση-ανατίναξη, χαλαζιακοί φυλλίτες)

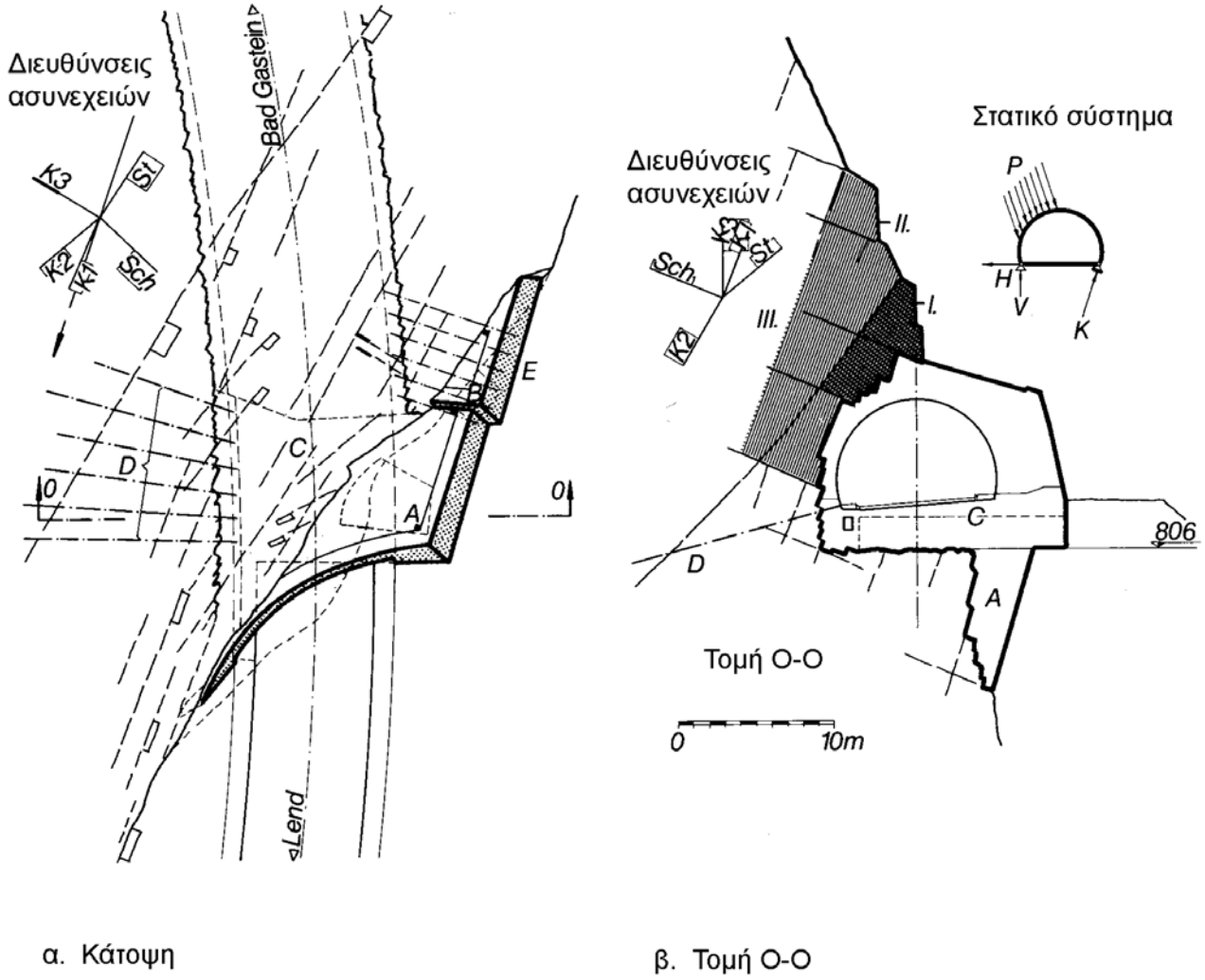


(β) Λοξή πρόσπτωση σε απότομο πρανές με μετάθεση των μετώπων και προστασία από βραχοπτώσεις της οδικής σήραγγας Kienbergwand στην Αυστρία και της διπλανής της ποδηλατικής σήραγγας (1167m μήκος οδικής, 847m ποδηλατικής, 22-51m² διατομής, 22 μήνες 2003-2005, διάτρηση-ανατίναξη, Δολομίτες

Σχήμα 6-4. Λοξά στόμια



*Σχήμα 6-5. Διαμόρφωση ορύγματος και ανάπτυξη τοιχίων για λοξή πρόσπτωση της χάραξης σε απότομο πρανές (*Müller*, 1978)*



Σχήμα 6-6. Βαριά μέτρα στήριξης για τη λοξή πρόσπτωση της χάραξης στο πρανές στο βόρειο στόμιο της σήραγγας Klammstein (Müller und Pacher, 1961)

Στην περίπτωση των στομίων της οδικής σήραγγας ΑΣ1 στην Κακιά Σκάλα, όπου η χάραξη στα στόμια είναι σχεδόν παράλληλη με την παράταξη των απόκρημνων πρανών, χρειάστηκε η τεχνητή μεταβολή του ανάγλυφου στα στόμια με την έγχυση μεγάλης ποσότητας σκυροδέματος σε τύπους, ώστε στη συνέχεια η πρόσπτωση να είναι κάθετη στο διαμορφωμένο μέτωπο του στομίου. Κατ' αυτόν τον τρόπο η διάνοιξη, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6-7, πραγματοποιείται μέσα σε πέτρωμα και σκυρόδεμα. Σε ένα από τα στόμια μάλιστα, στο χώρο της διάνοιξης, αντί για σκυρόδεμα τοποθετήθηκε διογκωμένη πολυστερίνη που διευκόλυνε επιπλέον την εκσκαφή.





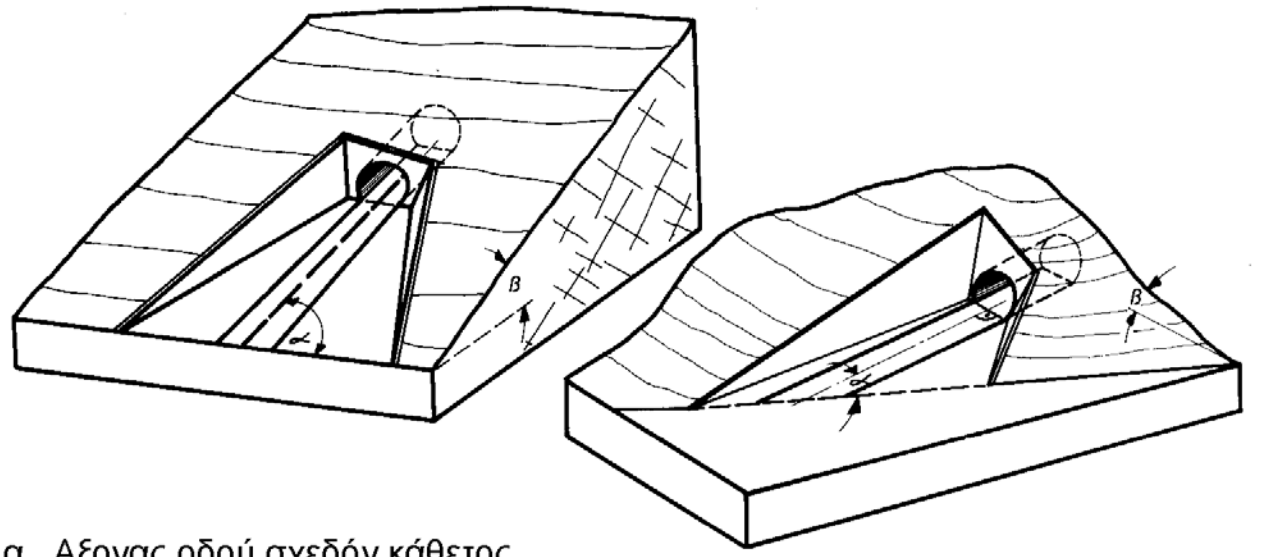
Σχήμα 6-7. Δυτικό στόμιο σήραγγας ΑΣ1 Κακιάς Σκάλας, αριστερά από μακριά και δεξιά από κοντά. Κατασκευή σκυροδέματος επάνω στο πέτρωμα προκειμένου να δημιουργηθεί κάθετο μέτωπο στη χάραξη

Στην περίπτωση ήπιων πρανών, για σχεδόν κάθετη πρόσπτωση (Σχήμα 6-8, Σχήμα 6-9α), η λοξή τοποθέτηση του μετώπου δεν προσφέρει πλεονεκτήματα και συνήθως δεν εφαρμόζεται. Αντίθετα, στην περίπτωση λοξής πρόσπτωσης στο πρανές (Σχήμα 6-9β,), η κάθετα στη χάραξη τοποθέτηση του μετώπου είναι αντιοικονομική. Πέραν της λοξής τοποθέτησης εφαρμόζεται με επιτυχία και η μετάθεση των στομίων όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-10. Μεγάλης κλίμακας μετάθεση των στομίων παρατηρούμε στις οδικές σήραγγες ΑΣ1 και ΑΣ2 της Κακιάς Σκάλας όπου τα πρανή είναι απόκρημνα (Σχήμα 6-10β), ενώ μικρότερης κλίμακας μεταθέσεις παρατηρούμε σε πιο ήπια πρανή με λιγότερο λοξές προσπτώσεις, όπως π.χ. στο δυτικό στόμιο της σήραγγας Διχαλορέματος στη Φθιώτιδα.





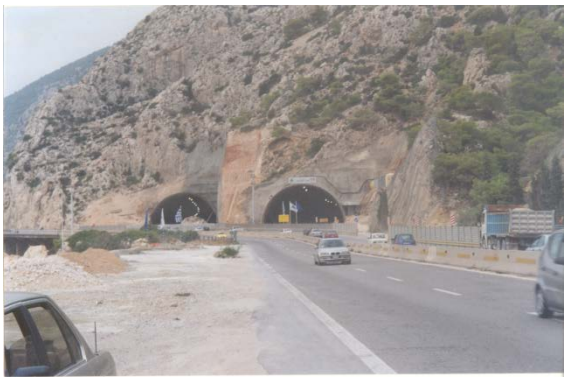
Σχήμα 6-8. Κάθετη πρόσπτωση σε ήπιο πρανές της δίδυμης δίιχνης οδικής σήραγγας Heidkopf στη Γερμανία (2x1720m μήκος, 93-105m^2 διατομή, 30 μήνες 2003-2006, ανατίναξη και εκσκαφέας, ψαμμίτες-ασβεστόλιθοι).



Σχήμα 6-9. Διαμόρφωση ορύγματος και τοιχίων για πρόσπτωση χάραξης σε ήπιο πρανές (Müller, 1978)



(α) Μετάθεση στομίων στη σήραγγα Σ1 (Βέροια), σε ασβεστόλιθους



(β) Μετάθεση των ανατολικών στομίων της οδικής σήραγγας ΑΣ2 Κακιάς Σκάλας

Σχήμα 6-10. Μετάθεση στομίων

Στην περίπτωση πεδινού ή κατηφορικού τοπίου εξετάζεται πόσο μακριά μπορεί να τραβηχτεί το στόμιο σε σχέση με τα γειτονικά δομήματα. Στο Σχήμα 6-11 αριστερά φαίνεται στόμιο χωρίς κάλυψη: Το τμήμα καθόδου θα δίνει την εντύπωση μιας επιμήκους οπής στο έδαφος, που μόνον αυτή θα είναι ορατή από τα πλάγια. Το όρυγμα που δημιουργείται μπορεί να ενισχύσει τα προβλήματα θορύβου. Στο Σχήμα 6-11 μέση φαίνεται στόμιο με μερική κάλυψη: Το άνοιγμα θα είναι ορατό στο επίπεδο της οδού, αλλά δεν θα εξουσιάζεται από το κατακόρυφο δομικό στοιχείο. Στο Σχήμα 6-11 δεξιά φαίνεται στόμιο με πλήρη κάλυψη: Το στόμιο τραβιέται προς τα εμπρός ώστε να καλύπτεται από την αρχή η εκσκαφή. Αυτή η λύση θα μειώσει αρκετά τα επίπεδα θορύβου, αλλά θα οδηγήσει σε μια κυρίαρχη κατασκευή στο επίπεδο της οδού. Αυστηροί όροι πρέπει να συνδέονται με τη μορφή και την κάλυψη του στομίου. Σε πλάγια όψη η κάλυψη θα δώσει την εντύπωση ενός εμποδίου, και είναι πολύ δύσκολο να προσαρμοστεί στις αστικές περιοχές.



Σχήμα 6-11. Στόμια σε πεδινό τοπίο

6.2.2 Περιορισμοί από ύπαρξη άλλων κατασκευών

Η ύπαρξη δομημάτων ή δικτύων είναι δυνατόν να επιβάλει τη μετακίνηση της θέσης του στομίου. Στη φάση κατασκευής του έργου μάλιστα είναι δυνατόν να απαιτηθεί μετάθεση του στομίου, ώστε η όλη κατασκευή να βρίσκεται εντός των καθορισθέντων ορίων. Στην εικόνα στο Σχήμα 6-12 φαίνεται η διαμόρφωση του στομίου της σήραγγας Ασπρονερίου που μετατοπίσθηκε προς τα έξω προκειμένου οι εκσκαφές να παραμείνουν εντός των ορίων απαλλοτρίωσης.



Σχήμα 6-12. Δυτικό στόμιο σήραγγας Ασπρονερίου Φθιώτιδας. Μετακίνηση στομίου προς τα έξω λόγω ύπαρξης ιδιοκτησιών

6.3 Γεωλογικές συνθήκες

Η εξόρυξη των μετώπων των στομίων είναι από τα δυσκολότερα σημεία της διάνοιξης και γι' αυτό πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή κατά την εκσκαφή και υποστήριξη τους ώστε να εξασφαλίζεται η ευστάθεια της σήραγγας και των πρανών. Οι γεωλογικές συνθήκες έχουν συνήθως μεγαλύτερη σημασία από τις τοπογραφικές.

6.3.1 Τοπικές γεωλογικές συνθήκες διάνοιξης

Τα επιφανειακά τμήματα του πετρώματος δείχνουν τις παρακάτω ιδιαιτερότητες σε σχέση με τα βαθύτερα:

- Επιφανειακά το πέτρωμα είναι αποσαθρωμένο, και ως εκ τούτου έχει μειωμένη αντοχή. Ειδικά τα στρωσιγενή ή σχιστοποιημένα πετρώματα και οι γρανίτες επιδεικνύουν ευθραυστότητα.
- Οι διακλάσεις είναι περισσότερο ανοικτές και γενικότερα το πέτρωμα είναι χαλαρωμένο. Η εκτόνωση των κατακλάσεων αυξάνει τον αριθμό των οικογενειών ασυνεχειών και το βαθμό κερματισμού.
- Κορήματα κλιτύων, αποθέσεις και προϊστορικές κατολισθήσεις προξενούν συχνά ξαφνικές αλλαγές του πετρώματος και μη προβλεπόμενες εντατικές καταστάσεις.
- Κάτω από μία ζώνη εκτόνωσης των τάσεων, λόγω μειωμένης αντοχής του πετρώματος, βρίσκεται σε άμεση γειτονία παράλληλα με το πρανές μια ζώνη στην οποία συγκεντρώνονται υψηλότερες τάσεις από αυτές που υπάρχουν πιο βαθιά.
- Ο ερπυσμός του πρανούς επιφέρει στο όρυγμα και στα μέτρα υποστήριξής του μια ώθηση που μπορεί να είναι και ασύμμετρη. Εδώ θα πρέπει να τονιστεί, ότι όχι μόνο τα απόκρημνα πρανή αλλά και τα ήπια δύνανται να έρπουν.

6.3.2 Ευστάθεια περιοχής

Στα στόμια σημασία έχουν ο τεκτονισμός του πετρώματος, και ιδιαίτερα τα ρήγματα, η ενεργότητά τους και οι ανοικτές ασυνέχειες. Σημασία έχει επίσης συχνά ο εντοπισμός του ορίου μεταξύ βράχου και χαλαρών εδαφικών σχηματισμών. Για παράδειγμα, στο ανατολικό στόμιο της οδικής σήραγγας Διχαλορέματος στη Φθιώτιδα, που φαίνεται στο Σχήμα 6-13, οι επιφανειακοί σχηματισμοί από ερυθρές αργίλους βρίσκονται πάνω από χαλαρά ασβεστολιθικά λατυποπαγή. Η διάνοιξη προβλέπονταν να πραγματοποιηθεί μέσα στον δεύτερο σχηματισμό που ανερχόταν αργά με την προχώρηση. Η επιτυχής πρόβλεψη έδωσε τη δυνατότητα καθορισμού της θέσης έναρξης του υπογείου έργου, ώστε να αποφευχθούν τα προβλήματα που θα προέκυπταν από τη διάνοιξη κάτω από τον πιο ασταθή επιφανειακό σχηματισμό της ερυθράς αργίλου.



Σχήμα 6-13. Ανατολικό στόμιο σήραγγας Διχαλορέματος Φθιώτιδας, αριστερά από μακριά και δεξιά από κοντά. Φαίνεται ο σχηματισμός των χαλαρών λατυποπαγών κάτω από το σχηματισμό της ερυθράς αργίλου.

Εν τούτοις δεν είναι πάντα δυνατό να αποφευχθούν οι δύσκολες γεωλογικές συνθήκες, και συμβαίνουν συχνά αστοχίες που είναι δυσάρεστες τόσον στον κατασκευαστή όσον και στον κύριο του έργου. Μια τέτοια

αστοχία σε μία διάνοιξη που μόλις ξεκινά, όχι μόνο καθυστερεί την ολοκλήρωσή της αλλά και ανεβάζει δυσανάλογα το κόστος της.

Στο Σχήμα 6-14 φαίνεται η κατάχωση του στομίου μιας σήραγγας που είχε σαν αποτέλεσμα το σταμάτημα των εργασιών και εκτεταμένες εργασίες αντιστήριξης. Η εκσκαφή για τη διαμόρφωση του στομίου δημιούργησε αστάθεια στο πρανές, η οποία θα έπρεπε να είχε προβλεφτεί, καθόσον προϋπήρχαν εμφανή χαρακτηριστικά από ολισθήσεις στην επιφάνεια. Η αποκατάσταση απαίτησε βαθιές αγκυρώσεις του υπερκείμενου πρανούς πριν από την επανεκσκαφή του στομίου. Άλλο παράδειγμα αστοχίας είναι η κατάχωση της διάνοιξης από κατολίσθηση των υψηλών πρανών που δημιουργήθηκαν κατά την κατασκευή του νότιου δυτικού στομίου της οδικής σήραγγας Μποζαΐτικων για την παράκαμψη Πατρών. Παράδειγμα επίσης αστοχίας, χωρίς όμως κατάχωση, είναι και καταστροφή της επένδυσης στο ανατολικό στόμιο της σήραγγας Εγνατίας οδού Σ3, στη Βέροια. Στο Σχήμα 6-15 φαίνεται η κατασκευή δύο σηράγγων εκτροπής σε πέτρωμα που εμπεριέχει επιφάνειες ολίσθησης. Εφόσον η κατασκευή πραγματοποιούνταν με ανοικτή εκσκαφή, θα ενεργοποιούνταν κατολίσθηση, η οποία άλλως συγκρατείται από την υπό εκσκαφή γεωμάζα.

Σε περιοχές με έντονες πτυχώσεις του τοπίου, οι γεωλογικές μορφές οδηγούν στην τοποθέτηση του στομίου στο μυχό όπου ο άξονας προσπίπτει κάθετα στο πρανές. Όμως εκεί πάντα υπάρχει υποψία ύπαρξης ρήγματος που θα έχει συντελέσει στη διάβρωση του πετρώματος. Ανάλογα με τη διεύθυνση πρόσπτωσης και των συνθηκών υπόγειων νερών, δύναται η θέση να είναι ευνοϊκή ή δυσμενής.



Σχήμα 6-14. Στόμιο σε ζώνη διάτμησης (Pacher, 1974)



Σχήμα 6-15. Αστάθεια πρανούς λόγω προσωρινού ορύγματος (Pacher, 1974)

6.3.3 Ύπαρξη νερών

Ιδιαίτερης σημασίας είναι οι υδρογεωλογικές συνθήκες. Θέσεις όπου υπάρχει ροή νερού, ιδιαίτερα σε χαλαρούς σχηματισμούς, θα πρέπει να αποφεύγονται. Στη σήραγγα Ασπρονερίου (Σχήμα 6-12) παρατηρήθηκε μικρή αλλά συνεχής ροή νερού στο βόρειο δυτικό στόμιο καθ' όλη τη διάρκεια της διάνοιξης. Η υψηλή στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα συνετέλεσε στη, μικρή τελικά, αστοχία του βόρειου πλευρικού πρανούς.

6.3.4 Εντατικό πεδίο

Στην περιοχή του στομίου η ελεύθερη επιφάνεια του πρανούς αποτελεί κύριο επίπεδο τάσεων. Επομένως, πλησίον της επιφανείας του πρανούς, η μέγιστη κύρια τάση αναμένεται να είναι παράλληλη σε αυτό.

6.4 Εκσκαφή και διαμόρφωση φορέων αντιστήριξης

6.4.1 Προ-όρυγμα και ετοιμασία υπόγειας διάνοιξης

6.4.1.1 Ύψος προ-ορύγματος

Όλες οι δυσκολίες που παρατηρούνται κατά τη διαμόρφωση των στομίων αυξάνουν με την τρίτη δύναμη του μέγιστου ύψους του ορύγματος, που στην περίπτωση λοξής πρόσπτωσης μπορεί να είναι ιδιαίτερα μεγάλο, όπως επίσης και το μήκος του προ-ορύγματος. Η δημιουργία του προ-ορύγματος πρέπει να προσαρμοστεί βέλτιστα στη μορφή του ανάγλυφου ώστε να ελαχιστοποιηθούν το ύψος του και ο όγκος του. Το ύψος μειώνεται με τη δημιουργία καμπύλων φορέων, αντί επίπεδων τοιχίων αντιστήριξης. Σήμερα υπάρχει η δυνατότητα διάνοιξης της σήραγγας στα στόμια κάτω από πολύ μικρό υπερκείμενο, με αποτέλεσμα τόσον το ύψος όσον και το μήκος του προ-ορύγματος να μειώνονται σημαντικά. Η οικονομική σύγκριση μιας μικρού ή μεγαλυτέρου βάθους υπερκειμένων υπόγειας διάνοιξης στομίου δεν μπορεί να αποτελεί πια το μόνο μέτρο επιλογής, καθόσον ο κίνδυνος κατάχωσης και η αισθητική αποδοχή είναι πολύ πιθανό να επιβάλλουν, με βέτο, την αρμόζουσα λύση.

6.4.1.2 Προστασία εισόδου

Συνήθως πραγματοποιείται με την κατασκευή προπλαισίων, μεταξύ των οποίων τοποθετούνται χαλύβδινες πλάκες στις οποίες εκτοξεύεται σκυρόδεμα. Εκτός αυτού τα πρανή στηρίζονται με σκυρόδεμα και αγκύρια για προστασία από καταπτώσεις.

6.4.1.3 Προϋποστήριξη

Στα πρώτα μέτρα της διάνοιξης μέσα σε ασταθείς σχηματισμούς, η εκσκαφή πραγματοποιείται συχνά κάτω από ομπρέλα δοκών προπορείας. Τούτο επιτρέπει σήμερα τη διάνοιξη με πολύ μικρό ύψος υπερκειμένων.

6.4.1.4 Όρυξη προ-ορύγματος

Η όρυξη του προ-ορύγματος θα πρέπει να γίνεται σε τμήματα όχι μεγαλύτερα από αυτά που οι γεωλογικές συνθήκες επιτρέπουν ώστε να μη διεγερθεί η ώθηση του πρανούς. Οι επιφάνειες εκσκαφής πρέπει το ταχύτερο δυνατό να στηρίζονται. Τυχόν χαλαρώσεις και μετατοπίσεις που μπορεί να συμβούν θα πρέπει να σταθεροποιούνται με γέμισμα και ενεμάτωση των κενών. Η συνήθης πρακτική απαιτεί τη διαμόρφωση των στομίων πριν από την έναρξη της υπόγειας διάνοιξης. Εν τούτοις, σε κάποιες περιπτώσεις, η συνολική διάνοιξη (ή τα πρώτα τόξα της υποστήριξης) μπορεί να κατασκευαστεί από μέσα προς τα έξω, πριν από την κατασκευή των στομίων, όπως π.χ. στα ανατολικά στόμια της οδικής σήραγγας Αρχαιολογικού χώρου για την παράκαμψη Πατρών και στο ανατολικό στόμιο της οδικής σήραγγας Σκορλίγκα στη χάραξη Άρτα- Τρίκαλα. Σε γεωλογικά δύσκολες περιπτώσεις, της διάνοιξης από μέσα προς τα έξω, μπορεί να προηγείται η κατασκευή των στομίων ώστε το σταθεροποιημένο πέτρωμα να μην κινδυνεύει από χαλάρωση. Τα μέτρα που λαμβάνονται κατά τη διάνοιξη των στομίων συναρτώνται κυρίως με τον απαντώμενο σχηματισμό.

Σε εδαφικούς σχηματισμούς, μερικά από τα μέτρα που λαμβάνονται είναι: η εκσκαφή του εδάφους μέχρι το πέτρωμα που όμως ενέχει τον κίνδυνο της ανάγκης πραγματοποίησης έργων σταθεροποίησης μεγάλης έκτασης, η μείωση της κλίσης των πρανών, η σταθεροποίηση με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκύρια, η κατασκευή αγκυρωμένου τοιχίου, η κατασκευή φρεατοπασσάλων ή τοιχίων από πασσαλοσανίδες πριν από την εκσκαφή του προ-ορύγματος, η προενίσχυση με τσιμεντενέσεις, το τράβηγμα προς τα έξω της τελικής επένδυσης με επίχωση της, και η αγκύρωση του φέροντος δακτυλίου του πετρώματος.

Σε κακής ποιότητας πέτρωμα, μερικά από τα μέτρα που λαμβάνονται είναι: η αγκύρωση πάνω από το μέτωπο, και κάποια πιο εξεζητημένα όπως η σταδιακή διεύρυνση της σήραγγας, και η διάνοιξη σήραγγας οδηγού με στη συνέχεια διεύρυνση από μέσα προς τα έξω

Σε υγιές πέτρωμα, μερικά από τα μέτρα που λαμβάνονται είναι η σταθεροποίηση και αγκύρωση εκείνων των τμημάτων πάνω από το μέτωπο που από τις δονήσεις των ανατινάξεων μπορούν να χαλαρώσουν και η ελεγχόμενη ανατίναξη με μειωμένη προχώρηση και ποσότητα γόμωσης.

6.4.1.5 Προστασία πρανών

Τα μέτρα προστασίας των πρανών συχνά περιλαμβάνουν :

- Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και δομικό πλέγμα Τ131. Συνήθως προβλέπονται λίγες ανακουφιστικές οπές (wheep holes) στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.
- Βλήτρα φ25 ολόσωμης τσιμενταρισμένης πάκτωσης μήκους 3 έως 6 m, ποιότητας S400.
- Προενταμένες ράβδοι τύπου τσιμενταρισμένης ολόσωμης πάκτωσης μήκους 6 - 8 m φορτίου λειτουργίας 100 kN (φ25). Οι διαστάσεις του κανάβου εξαρτώνται από την ποιότητα των συναντώμενων σχηματισμών και κυμαίνονται μεταξύ 2.0Χ2.0 m και 4.0Χ4.0 m.
- Προενταμένες αγκυρώσεις σε δοκούς, τοπικά, όπου υπάρχουν κίνδυνοι χαλάρωσης και αστοχιών των σχηματισμών που μπορούν να ενεργοποιήσουν σε κατολίσθηση μεγαλύτερους όγκους. Οι αγκυρώσεις αυτές μπορεί να είναι φορτίου λειτουργίας 200 - 400 kN το δε μήκος τους εξαρτάται από το μέγεθος του προς αντιμετώπιση προβλήματος.
- Αποστραγγιστικές οπές διαμέτρου 3” και κατάλληλου μήκους ανάλογα με τις συναντώμενες συνθήκες. Σε δυσμενέστερες περιπτώσεις εκτελείται κάναβος απαστραγγιστικών οπών.
- Πάσσαλοι από οπλισμένο σκυρόδεμα ή χαλύβδινες δοκούς ή συνδυασμός των προηγουμένων.
- Άλλες πιο εξειδικευμένες μέθοδοι όπως εδαφοπάσσαλοι (jet grouting), κλπ.
- Για την προστασία από βραχοπτώσεις κατασκευάζονται ειδικοί φράχτες, βραχοπαγίδες, και στέγαστρα.

6.4.1.6 Βραχοκολώνα

Όπου πρόκειται να κατασκευαστούν δίδυμες σήραγγες, η βραχοκολώνα μεταξύ των δύο κλάδων πρέπει να είναι πάχους τουλάχιστον 10 m (Muller, 1978). Στις αστικές περιοχές η έλλειψη χώρου μπορεί συχνά να οδηγήσει σε μια μείωση αυτής της απόστασης. Συχνά εν τούτοις ο κανόνας αυτός δεν τηρείται, επειδή δεν είναι δυνατόν να διαχωριστούν επαρκώς οι δύο κλάδοι της οδού στην περιοχή του στομίου, με αποτέλεσμα να κατασκευάζεται βραχοκολώνα πολύ μικρού πάχους, όπως π.χ. στους δολομιτικούς σχηματισμούς της σήραγγας Κνημίδας (Σχήμα 6-16α), αλλά και σε αργιλικούς σχηματισμούς, όπως για παράδειγμα φαίνεται στο Σχήμα 6-16β, στα νότιο-δυτικά στόμια της σήραγγας Γηροκομείου.



(α) Στόμια δίδυμης οδικής σήραγγας Κνημίδας σε δολομίτες αμέσως μετά από το ενεργό σεισμικό ρήγμα Καμένων Βούρλων.



(β) Νότιο-δυτικά στόμια σήραγγας Γηροκομείου οδικής παράκαμψης Πατρών, μέσα σε μαργαϊκές αργίλους.

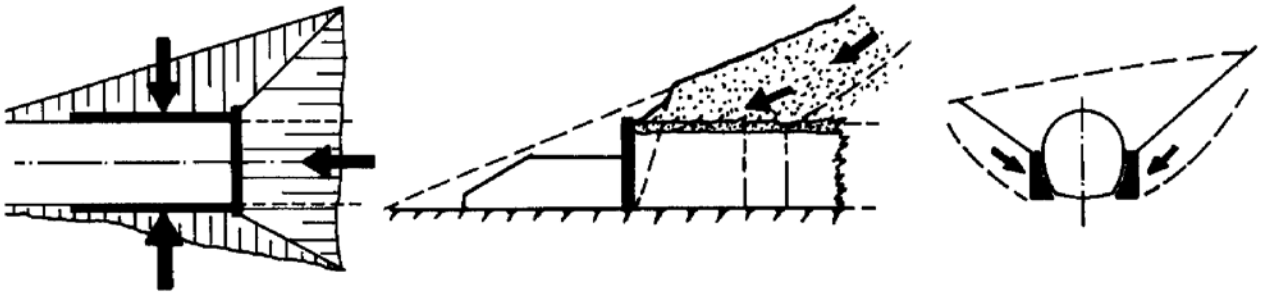
Σχήμα 6-16. Βραχοκολόνα μεταξύ στομίων δίδυμων σηράγγων

6.4.2 Στατική των τοιχίων

6.4.2.1 Σκοπός

Τα τοιχία των στομίων έχουν σα σκοπό να:

- δώσουν στην επένδυση της σήραγγας και στη στεγάνωσή της ένα τέρμα.
- προστατεύσουν την περιοχή του στομίου από καταπτώσεις λίθων.
- παρέχουν αντίσταση στις ερπυστικές ωθήσεις των πετρωμάτων (Σχήμα 6-14), τόσο στο μέτωπο όσο και στα πλευρά του ορύγματος.
- ανακόπτουν την προς τα έξω ώθηση (Σχήμα 6-17, αριστερά και μέση) των πρώτων πλαισίων, η οποία προκαλεί σκίσιμο των αρμών και συχνά ζημιά στη στεγάνωση.
- αναλάβουν στα πλευρά του ορύγματος ένα μέρος της ώθησης του πρανούς (Σχήμα 6-17, αριστερά και δεξιά).



Σχήμα 6-17. Κάθετη προσβολή χαλαρών σχηματισμών (Pacher, 1974)

6.4.2.2 Ωθήσεις

Παλαιότερα, η όρυξη πραγματοποιούνταν χειρωνακτικά σε μικρά βήματα, από έμπειρους μεταλλωρύχους, που δεν επέτρεπε το ξύπνημα ερπυστικών ωθήσεων. Εκτός αυτού, μολονότι στους υπολογισμούς διαστασιολόγησης δεν λαμβάνονταν υπόψη τέτοιες ερπυστικές ωθήσεις, η υιοθέτηση ενστικτωδώς βαριών κατασκευών επέτρεψε τη διαμόρφωση ασφαλών κατασκευών στομίων. Σήμερα η όρυξη πραγματοποιείται σε μεγάλα βήματα από ισχυρά χωματουργικά μηχανήματα ή με τη βοήθεια εκρηκτικών υλών, που μπορεί να διεγείρουν πολύ μεγάλες ερπυστικές ωθήσεις του πετρώματος.

Τα προ-ορύγματα των στομίων βρίσκονται συνήθως, τουλάχιστον μερικώς, μέσα σε επιφανειακούς σχηματισμούς που είναι αποσαθρωμένοι και χαλαρωμένοι. Οι γεωμάζες αυτές τείνουν στον ερπυσμό. Οι δυνάμεις που δημιουργούνται από αυτόν είναι πολύ δύσκολο έως αδύνατο να αναληφτούν. Μια σύγχρονη τεχνική θα έπρεπε επομένως, όπως παλαιότερα, να μην τους επιτρέψει να διεγερθούν. Τούτο επιτυγχάνεται με τη σταδιακή όρυξη περιορισμένων χώρων και γρήγορη αντιστήριξη των εκσκαπτομένων επιφανειών από ένα χωρικά λειτουργούν κλειστό σύστημα.

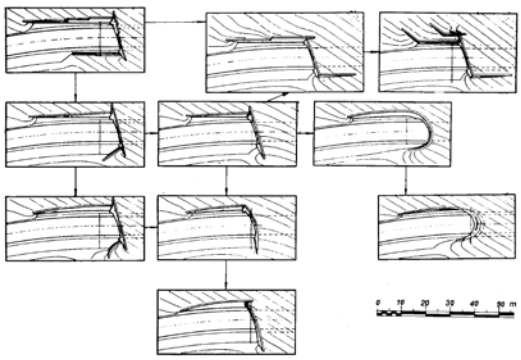
Εφόσον η πρόσπτωση της χάραξης είναι κάθετη στο πρανές, το μήκος των πτερυγοτοίχων είναι μικρό (Σχήμα 6-3) και αυτοί αναλαμβάνουν μικρές ωθήσεις γαιών. Η απαιτούμενη αντιστήριξη προσφέρεται εύκολα από το τοιχίο του μετώπου, καθώς αυτό είναι μικρού ύψους σε σχέση με την περίπτωση λοξής πρόσπτωσης (Σχήμα 6-5). Η ερπυστική ώθηση του πρανούς πρέπει να οδηγείται με ασφάλεια στο υπέδαφος. Τούτο μεταξύ άλλων επιτυγχάνεται με το τράβηγμα της μόνιμης επένδυσης της σήραγγας προς τα έξω, και τη στη συνέχεια επίχωσή της. Για λοξή πρόσπτωση της σήραγγας μεγαλώνουν οι δυσκολίες. Η ώθηση του πρανούς έρχεται από τα πλευρά, τα ορύγματα είναι υψηλότερα, οι ωθήσεις μεγαλύτερες, οι δυνάμεις ασύμμετρες. Προς την κοιλάδα, τόσον τα τοιχώματα της σήραγγας όσον και τα θεμέλια του στομίου χρειάζονται ενίσχυση.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι η επιλογή της θέσης του στομίου μιας σήραγγας συνδέεται με το μέγεθος ή την αποφυγή γεωλογικών ή στατικών δυσκολιών. Αυτές επομένως, μαζί με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της χάραξης θα πρέπει να καθορίζουν τη θέση του στομίου.

6.4.2.3 Διαμόρφωση

Εφόσον το μέτωπο του στομίου και οι πτερυγότοιχοι του προ-ορύγματος αναλαμβάνουν τις ωθήσεις των εδαφών ξεχωριστά, τούτο μπορεί να επιτευχθεί μόνο από ογκώδεις κατασκευές. Αν όμως ο τοίχος του μετώπου λειτουργεί χωρικά ως ένας φορέας με τον πτερυγότοιχο, τότε μπορούν να στηρίζονται αμοιβαία ο ένας στον άλλο. Επομένως, οι πτερυγότοιχοι του στομίου καλό είναι να μη διαχωρίζονται από το τοιχίο του μετώπου, ώστε οι ωθήσεις που ασκούνται από το περιβάλλον πέτρωμα να μεταφέρονται σε έναν ενιαίο τριδιάστατο φορέα. Η στατική λειτουργία μιας ενοποιημένης διαμόρφωσης τοίχου μετώπου και πτερυγοτοίχων είναι εύκολο να γίνει αντιληπτή, όμως η διαστασιολόγηση των τοίχων είναι πολύ δυσκολότερη εργασία. Ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης του άξονα της χάραξης στο πρανές, μοιράζονται οι ωθήσεις στα τοιχία, των οποίων η φόρτιση εξαρτάται και από τη φάση κατασκευής.

Εφόσον ο τοίχος μετώπου και οι πτερυγότοιχοι είναι επίπεδοι φορείς που συνδέονται ισχυρά στις τομές τους, δημιουργείται πτυχωτός φορέας (Σχήμα 6-18α, αριστερά). Εν τούτοις οι δυνάμεις που αναλαμβάνουν τα τοιχία, σε μικρή απόσταση από την τομή τους, δεν μπορούν να διαβιβαστούν από τον έναν τοίχο στον άλλο χωρίς τη δημιουργία πολύ υψηλών καμπτικών και στρεπτικών ροπών. Αντίθετα, η κατασκευή κελυφωτού φορέα αντί διακριτών πτερυγοτοίχων και τοιχίου μετώπου, δημιουργεί φορέα που μπορεί να διαβιβάσει τα φορτία μέσα από το σώμα του χωρίς τη δημιουργία ανεπιθύμητα μεγάλων εσωτερικών δυνάμεων (Σχήμα 6-18α, δεξιά). Ενδιάμεση λύση αποτελεί η δημιουργία πτυχωτού καμπύλου φορέα (Σχήμα 6-18α, μέσον) αποτελούμενου από διακριτά τοιχία συνδεμένα στην τομή τους. Η λύση αυτή, που θυμίζει τοξωτό φράγμα, επιτρέπει στο τοιχίο την οριζόντια λειτουργία θόλου που αποφορτίζει σημαντικά τη λειτουργία προβόλου. Οι εσωτερικές δυνάμεις μέσα στο φορέα της αντιστήριξης είναι κυρίως θλιπτικές, με αποτέλεσμα την καλύτερη εκμετάλλευση της αντοχής του. Μία ενοποίηση τοίχου μετώπου και πτερυγότοιχων σε ένα ενιαίο στατικό σύστημα αυξάνει την ασφάλεια και την οικονομικότητα. Στο Σχήμα 6-18β φαίνεται η πλευρική πασσαλοστοιχία στο βόρειο πρανές του δυτικού στομίου της σήραγγας Ασπρονερίου Φθιώτιδας. Η αστοχία που παρατηρήθηκε στο πρανές και η σύγχρονη μετατόπιση των πασσάλων, συγκρατήθηκαν, χωρίς να έχουν υπολογιστεί γι' αυτό, στην περιοχή της τομής με το μετωπικό τοιχίο από το τελευταίο. Τούτο έγινε φανερό από τη διατμητική θραύση που παρατηρήθηκε στον πλευρικό πασσαλόδεσμο. Σε άλλες περιπτώσεις, στην ανάληψη φορτίων μπορεί να συνεισφέρει και η τραβηγμένη προς τα έξω τελική επένδυση της σήραγγας.



(α) Στάδια σχεδιασμού της διαμόρφωσης των στομίων της σήραγγας του Harburg (John, 1957)



(β) Βόρειο πρανές δυτικού στομίου σήραγγας Ασπρονερίου. Η (μη υπολογισμένη) στήριξη του τοιχίου του πλευρικού πρανούς στο τοιχίο του μετωπικού πρανούς βοήθησε στην αντιστήριξη της πλευρικής πασαλοστοιχίας μετά την αστοχία που παρατηρήθηκε στο πλευρικό πρανές

Σχήμα 6-18. Ενιαία στατική λειτουργία τοιχίων στομίων

6.4.2.4 Θεμελίωση των τοιχίων

Τα τοιχία στην περιοχή των στομίων απαιτούν αποτελεσματική θεμελίωση, που σε χαλαρούς σχηματισμούς είναι δύσκολή. Σήμερα συνηθίζεται η κατασκευή φρεατοπασσάλων στους σχηματισμούς αυτούς, Άλλες

λύσεις αποτελούν η εκσκαφή μέχρι το πιο στερεό υπόβαθρο και η στήριξη του τοίχου με δημιουργία οδόντωσης στο επίπεδο αυτό ή η δημιουργία κλειστού δακτυλίου.

Η κατασκευή πρέπει να προσαρμόζεται στη δυνατότητα ανάληψης φορτίων από το υπέδαφος, που είναι δυνατό να ποικίλει μέσα στο προ-όρυγμα.

6.4.2.5 Επίχωση απορρόφησης κρούσης

Για να προστατευτεί το εξερχόμενο κέλυφος του στομίου από φυσική ζημία η κατασκευή πρέπει να καλυφθεί από πάνω. Αυτό μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας ένα μαξιλάρι άμμου. Εάν το στόμιο είναι ορατό από τα πλευρά, τα εδαφικά καλύμματα πρέπει να σπαρθούν με χλόη.

6.5 Λειτουργικότητα

Η λειτουργικότητα του στομίου αφορά α) την οδική ασφάλεια που εμπεριέχει τις συνθήκες φωτισμού, την οδική σήμανση, τα στηθαία ασφαλείας, την παρενόχληση της προσοχής του οδηγού, β) την εξυπηρέτηση της περιοχής και γ) τους περιορισμούς από την ύπαρξη άλλων δομημάτων ή έργων υποδομής.

6.5.1 Οδική ασφάλεια

6.5.1.1 Φωτισμός

Η διαμόρφωση της περιοχής των στομίων θα πρέπει να διευκολύνει την προσαρμογή των ματιών των οδηγών από τα φωτεινά στα σκοτεινά, και αντίστροφα, με τρομπέτες μετάβασης ή θόλους φωτισμού. Γενικά, κάθε οδηγός αισθάνεται ανασφάλεια κατά την είσοδο του σε μία σήραγγα που δεν φωτίζεται. Το ανθρώπινο μάτι δεν έχει την ικανότητα επαρκώς γρήγορης προσαρμογής στην απότομη μεταβολή από μία φωτεινή κατάσταση σε μία σκοτεινή. Για λόγους οδικής ασφάλειας πρέπει να έχει ληφθεί πρόνοια ώστε οι οδηγοί να αναγνωρίζουν τυχόν εμπόδια στο εσωτερικό της σήραγγας σε μία απόσταση που να αντιστοιχεί κατ' ελάχιστον στην απόσταση πέδησης του οχήματος. Επειδή αυτή η απόσταση εξαρτάται από την ταχύτητα, επιβάλλεται περιορισμός στην ταχύτητα των οχημάτων, συνήθως 70 έως 80 km/h. Τα προβλήματα που υπεισέρχονται βασίζονται σε δύο ιδιότητες του ανθρώπινου ματιού, την αντιθετική όραση (αντίθεση - contrast) και την προσαρμογή (adaptation). Τα προβλήματα αντιθετικής όρασης αναφέρονται στη δυσκολία αίσθησης της διαφοράς πυκνότητας φωτισμού μεταξύ ενός αντικειμένου και του περιβάλλοντος του. Εφόσον η ευαισθησία του ανθρώπινου ματιού είναι ρυθμισμένη σε υψηλή πυκνότητα φωτισμού, δεν γίνονται αντιληπτά αντικείμενα στα σκοτεινά σημεία του οπτικού πεδίου, όπως όταν πλησιάζουμε το στόμιο μίας σήραγγας που στην περιοχή της εισόδου της δεν είναι επαρκώς φωτισμένη. Αυτή η δράση γίνεται ακόμη ισχυρότερη όταν το υπερκείμενο έδαφος στην περιοχή της εισόδου έχει μικρό ύψος και ένα μεγάλο τμήμα του ορατού πεδίου είναι ιδιαίτερα φωτεινό.

Προσαρμογή είναι το ταίριασμα της ευαισθησίας του ματιού σε μία μεταβαλλόμενη πυκνότητα φωτισμού. Το ανθρώπινο μάτι απαιτεί για να την επιτύχει ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, απαιτεί μάλιστα για το πέρασμα από φωτεινό σε σκούρο σημαντικά περισσότερο χρόνο απ' ότι από σκούρο σε φωτεινό. Το μεγαλύτερο απότομο βήμα πυκνότητας φωτισμού στο οποίο το ανθρώπινο μάτι προσαρμόζεται αμέσως, είναι 10:1. Μεγαλύτερα βήματα απαιτούν χρόνο προσαρμογής και ο μέσος χρόνος προσαρμογής του ματιού σε ένα νέο επίπεδο πυκνότητας φωτισμού είναι περίπου 10 s. Για το σκοπό αυτό δίνονται οδηγίες από τους κανονισμούς φωτισμού οδικών σηράγγων, όπως π.χ. στο DIN 67.524. Από άποψης φωτισμού η περιοχή της σήραγγας διακρίνεται (Σχήμα 6-19 κάτω) :

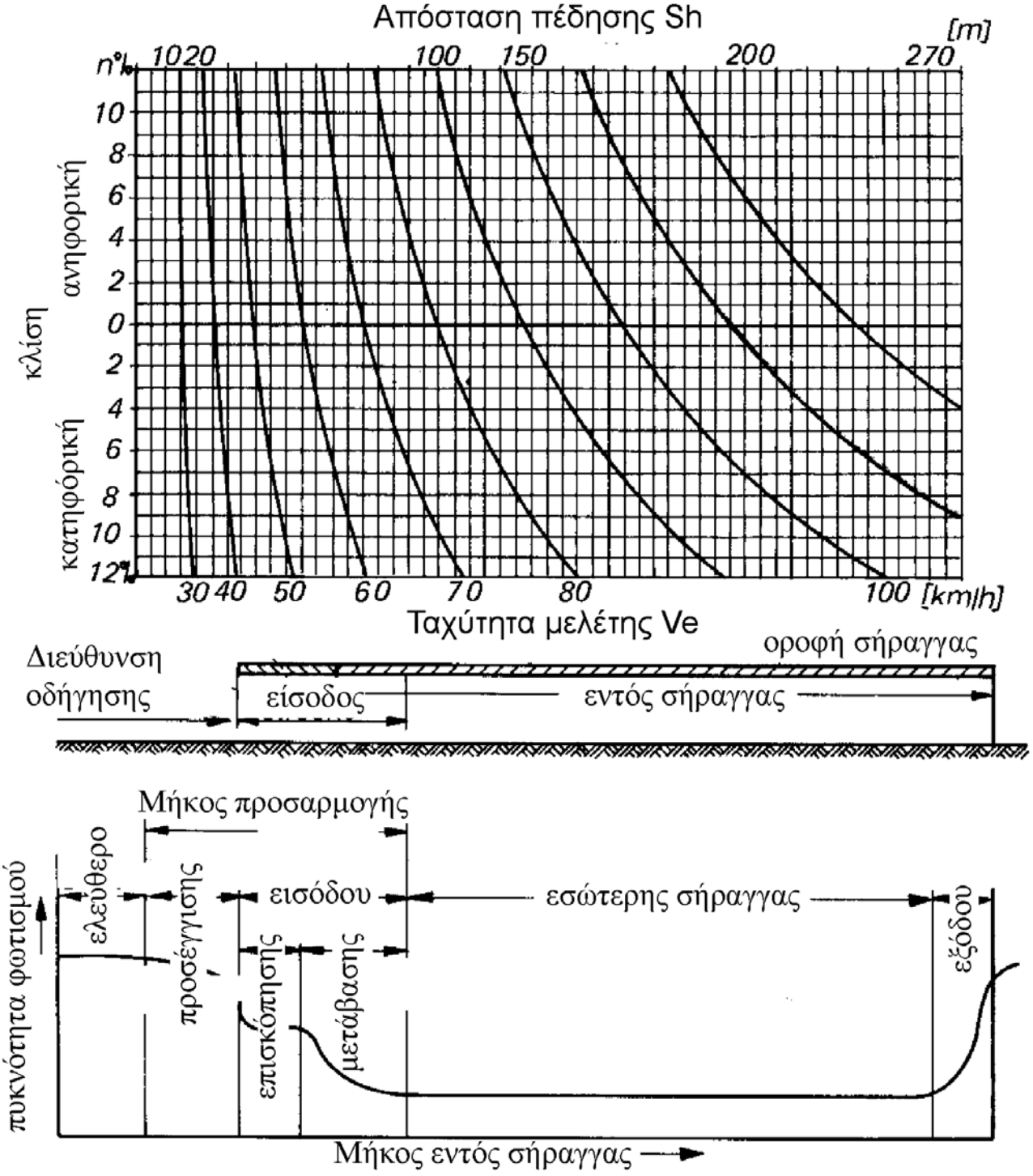
Στην περιοχή ελεύθερου πεδίου, όπου η προσαρμογή επηρεάζεται από το τοπίο.

Στην περιοχή προσαρμογής, η οποία διακρίνεται σε περιοχή προσέγγισης, επισκόπησης και μετάβασης. Στις δύο πρώτες επιτυγχάνεται το βήμα πυκνότητας φωτισμού. Το μήκος της περιοχής επισκόπησης πρέπει να είναι τουλάχιστον ίσο με το απαιτούμενο μήκος πέδησης (Σχήμα 6-19 άνω). Το μήκος της περιοχής μετάβασης καθορίζεται από τη μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα και την πυκνότητα φωτισμού.

Στην εσωτερική περιοχή της σήραγγας, στην οποία έχει επιτευχθεί η προσαρμογή και η πυκνότητα φωτισμού παραμένει σταθερή.

Στην περιοχή εξόδου, στην οποία το ανθρώπινο μάτι προσαρμόζεται πάλι στο φως της ημέρας.

Με ένα μεγάλο μήκος προσέγγισης μπορεί να επιτευχθεί μία ευνοϊκότερη πορεία προσαρμογής. Βοηθητικά προσφέρουν σκούρο οδόστρωμα, σκούρα πρανή, σκούροι τοίχοι αντιστήριξης, μεγάλα σκούρα μέτωπα στομίων, επίμηκες στόμιο σήραγγας, και φυτεύσεις πρασίνου που διαρκούν όλο το χρόνο. Στην περιοχή επισκόπησης ο Γερμανικός κανονισμός συνιστά την τοποθέτηση ανοικτόχρωμου οδοστρώματος, ανοικτόχρωμους και εύκολα καθαριζόμενους τοίχους και οροφές και κατασκευασμένες πριν από το στόμιο φωτεινές οροφές. Στην Ελβετία οι οροφές έχουν σκούρα χρώματα έτσι ώστε η προσοχή να επικεντρώνεται στο οδόστρωμα. Στο Σχήμα 6-20 φαίνεται διαμόρφωση στομίων με ανοίγματα φωτισμού. Με αυτούς τους τρόπους ο απαιτούμενος τεχνητός φωτισμός στην είσοδο μπορεί να περιορισθεί περίπου στο μισό. Η καμπύλη χάραξη της οδού στην περιοχή της εξόδου μειώνει την τύφλωση που προκαλείται από την εγγύτητα με το στόμιο.

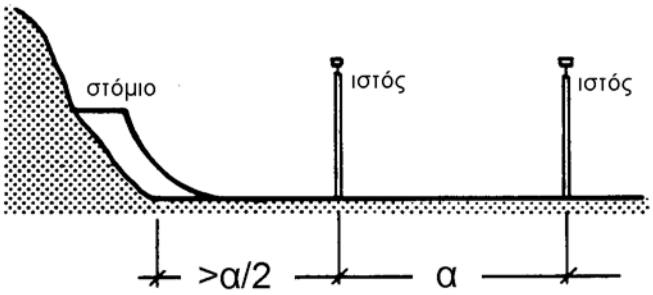


Σχήμα 6-19. Συνθήκες φωτισμού σε σήραγγες (DIN 67524)



Σχήμα 6-20. Φυσικός και τεχνητός φωτισμός ((Edwards and Graham, 1970)

Στη ζώνη εισόδου μπροστά από μια σήραγγα, αισθητικοί λόγοι περιορίζουν τη χρήση του κίτρινου φωτισμού. Για τη θέση των ιστών φωτισμού μπροστά από μια σήραγγα (Σχήμα 6-21) υφίστανται προδιαγραφές, καθόσον στο μέτωπο διακόπτεται η κανονική σειρά των ιστών. Συγκεκριμένα, ο τελευταίος ιστός δεν πρέπει να τοποθετηθεί πλησιέστερα στη σήραγγα από το μισό διάστημα τοποθέτησης των κανονικών φανών. Κατά τα άλλα, οι ίδιες αισθητικές αρχές ισχύουν για τον φωτισμό όπως και για τους δρόμους γενικά.



Σχήμα 6-21. Ιστοί φωτισμού έμπροσθεν σήραγγας (Norwegian Design Guide, 1990)

6.5.1.2 Οδική σήμανση

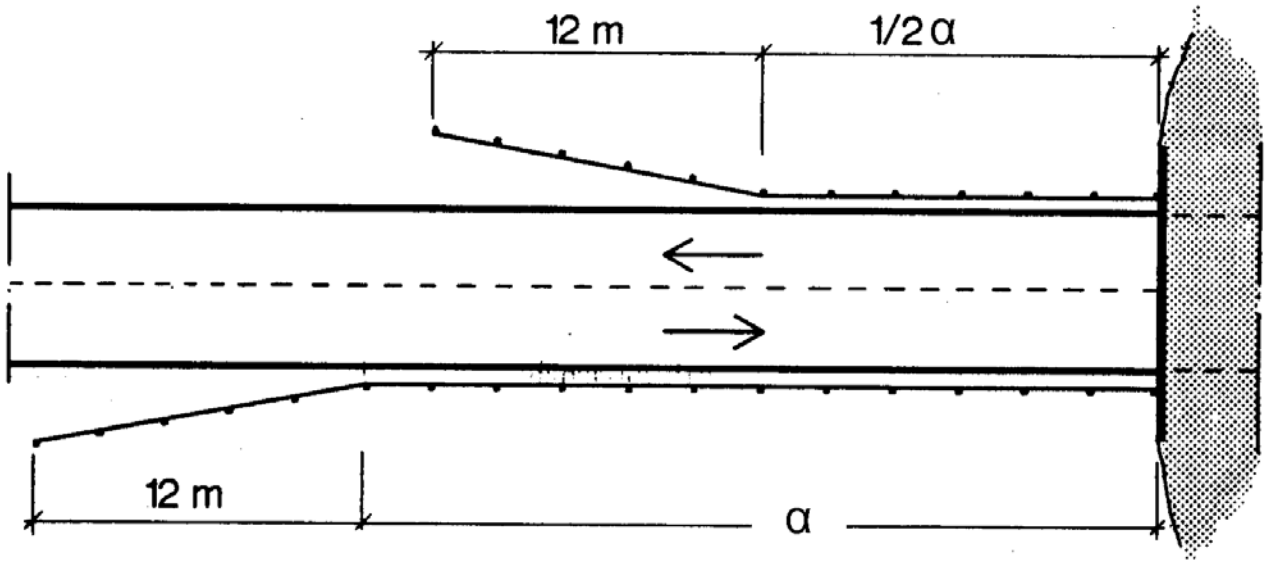
Σε μια είσοδο σηράγγων, υπάρχει, καταρχήν, ανάγκη για σήματα κυκλοφορίας. Αυτά πρέπει να τοποθετούνται σε μια απόσταση από την είσοδο για λόγους ασφάλειας. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην: ομοιομορφία του σχεδιασμού και την αποφυγή των περιττών οδικών σημάτων. Ικριώματα σήμανσης μπροστά από το στόμιο πρέπει να αποφεύγονται. Κανονισμοί δίνουν οδηγίες για τους τύπους και τη θέση τοποθέτησης των σημάτων.

6.5.1.3 Στηθαία ασφαλείας

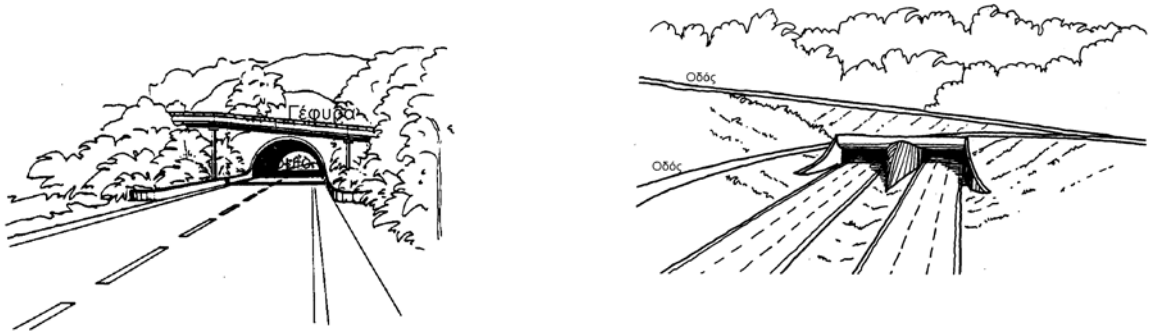
Στα στόμια πρέπει να δίνεται μια μορφή που να καθιστά περιττά τα μεταλλικά στηθαία. Όπου πρέπει να χρησιμοποιηθούν μεταλλικά στηθαία στο στόμιο της σήραγγας, το μήκος τους πρέπει να είναι τουλάχιστον αυτό που δίνεται στο Σχήμα 6-22. Τα μεταλλικά στηθαία εκτός σήραγγας πρέπει να στηρίζονται καλά στο στόμιο έτσι ώστε να μην καταστρέφονται μετά από μία πρόσκρουση, και οι στύλοι πρέπει να τοποθετούνται πλησιέστερα μεταξύ τους πλησίον του στομίου. Αρχιτεκτονικά, τα στηθαία από σκυρόδεμα συνδυάζονται καλύτερα με το σκυρόδεμα των στομίων. Τα στηθαία αυτά συνήθως τελειώνουν στην ίδια απόσταση από το μέτωπο και στις δύο πλευρές του δρόμου.

6.5.1.4 Παρενόχληση της προσοχής

Οι γέφυρες (Σχήμα 6-23, αριστερά) και τα άλλα δομήματα μπροστά από μια σήραγγα αφαιρούν προσοχή από την ίδια τη σήραγγα και πρέπει να αποφεύγονται. Επίσης, πρέπει να αποφεύγονται οι διαγώνιες γραμμές, που προκαλούνται από οδούς (Σχήμα 6-23, δεξιά) που διασχίζουν πίσω από ή επάνω από το στόμιο.



Σχήμα 6-22. Στηθαία εμπρός από στόμιο σήραγγας (Norwegian Design Guide, 1990)



Σχήμα 6-23. Γέφυρα (αριστερά) έμπροσθεν σήραγγας και εμφανείς οδοί (δεξιά) άνωθεν σήραγγας (Norwegian Design Guide, 1990).

6.5.2 Φροντίδα περιοχής

6.5.2.1 Εκτροπή θορύβου

Στις κατοικημένες περιοχές είναι συχνά απαραίτητο να υιοθετηθούν μέτρα μείωσης του θορύβου. Τα πετάσματα εκτροπής του θορύβου πρέπει να προσαρμόζονται στα υλικά, τη μορφή και το χρώμα του στομίου και του περιβάλλοντα χώρου.

6.5.2.2 Περίφραξη περιοχής

Η κυκλοφορία επάνω από τα στόμια πρέπει γενικά να αποφεύγεται. Εάν στην ύπαιθρο είναι απαραίτητη η περίφραξη στην περιοχή γύρω από το στόμιο σήραγγας, ο φράκτης πρέπει να τραβηχτεί μακριά από την στόμιο, έτσι ώστε να μην είναι ορατός. Η φύτευση μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης για να κρύψει τους φράκτες. Στις αστικές περιοχές η περίφραξη μπορεί να κατασκευαστεί ως φυσική συνέχεια των στομίων των σηράγγων ή άλλων δομημάτων πλησίον των στομίων.

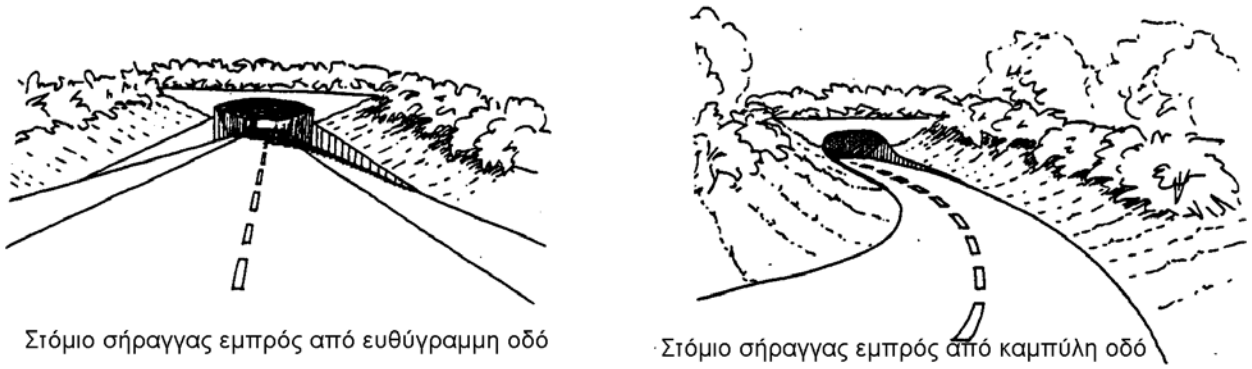
6.5.2.3 Βλάστηση

Η προστασία της υπάρχουσας βλάστησης είναι ιδιαίτερα σημαντική σε μια είσοδο σήραγγας, ενώ πρέπει να εξετάζεται η ανάγκη και για φύτευση πρόσθετης βλάστησης (Σχήμα 6-24, Σχήμα 6-25). Ο αρχιτέκτονας τοπίου χρησιμοποιεί τη βλάστηση για να διαιρέσει το τοπίο σε τμήματα, και για να το συνδέσει με τον περιβάλλοντα χώρο. Σε σημαντικές συμβολές οδικής κυκλοφορίας ο περιβάλλων χώρος μπορεί να διαιρεθεί σε μικρότερα τμήματα με τη φύτευση δέντρων και θάμνων. Η νέα βλάστηση πρέπει να φυτευτεί έτσι ώστε ότι εναρμονίζεται με το τοπίο. Στις εισόδους των σηράγγων υπάρχουν συχνά ρεύματα και δίνες αέρα. Επομένως, τα φυτά πρέπει να επιλεχτούν ώστε να ταιριάζουν στο τοπικό κλίμα και να ευδοκιμούν φυσικά στην περιοχή.



Σχήμα 6-24. Αριστερά: ΑΤΤΙΚΗ ΟΔΟΣ με στόμια χωρίς ανάπτυξη πρασίνου ακόμα. Δεξιά: Χλωρίδα στα στόμια που δένει με το τοπίο.

Η βλάστηση χρησιμοποιείται επίσης για να ενεργήσει ως σκιάστρο και για να μειώσει την τύφλωση. Κατά τα πρώτα έτη μετά από τη φύτευση, η βλάστηση θα έχει λίγη επίδραση ως σκιάστρο. Φυλλοβόλα δέντρα και θάμνοι δεν είναι κατάλληλα κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Ένα σκιάστρο πρέπει να αποτελείται από αειθαλή και φυλλοβόλα δέντρα και θάμνους. Τα αειθαλή παρέχουν σκιάστρο καθ' όλη τη διάρκεια του έτους ενώ τα φυλλοβόλα δέντρα μειώνουν την εντύπωση της σκοτεινής και βαριάς βλάστησης.



Σχήμα 6-25. Φύτευση έμπροσθεν σήραγγας (Norwegian Design Guide, 1990)

6.6 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Ένα στόμιο σήραγγας εκτός από ασφαλές και λειτουργικό πρέπει να μη δημιουργεί δυσάρεστες επιπτώσεις στο περιβάλλον και να εναρμονίζεται με τους σχετικούς περιορισμούς. Είναι γεγονός ότι τα ορύγματα στα στόμια

των σηράγγων διαφέρουν από το περιβάλλον τοπίο και στη μορφή και στο χρώμα. Εμφανίζονται συχνά ως πληγές στο περιβάλλον ή ως ξένα σώματα που δημιουργούν αρνητική οπτική επίπτωση. Το όρυγμα εισόδου και το στόμιο της σήραγγας πρέπει επομένως να σχεδιάζεται έτσι ώστε να αποτελεί, όσο το δυνατόν περισσότερο, ένα φυσικό κομμάτι του τοπίου στο οποίο ανήκει. Ένας καλαίσθητος σχεδιασμός στομίου επιτυγχάνεται με τον περιορισμό του μεγέθους του ορύγματος που θα εναρμονίζεται με το ανάγλυφο. Αυτό ισχύει τόσον για τις αστικές σήραγγες όσο και για εκείνες στις αγροτικές περιοχές.

6.6.1 Αισθητική αποδοχή

6.6.1.1 Αρχιτεκτονική μετώπου

Ήδη από το δέκατο όγδοο αιώνα τα στόμια διαμορφώνονταν αρχιτεκτονικά (Lacroix et al., 1991), όπως για παράδειγμα το Neutor (Σχήμα 6-1β) στο Salzburg. Το επιλεγμένο στυλ ανήκε στην εποχή, χωρίς αυτό όμως να ήταν μια περαστική μόδα. Η εμπειρία έχει δείξει επίσης, ότι την ορθή στατική λειτουργία τη νοιώθει αυτός που βλέπει το έργο, και αυτό συνήθως ικανοποιεί και αισθητικά.

Το χρώμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπογραμμίσει την αρχιτεκτονική του στομίου. Στην ύπαιθρο, πρέπει να επιλέγονται τα χρώματα που εναρμονίζονται με εκείνα του τοπίου. Στις αστικές περιοχές, τα γειτονικά κτίσματα επιδρούν στην επιλογή του χρώματος.

6.6.1.2 Τομή τελικής επένδυσης με τοιχίο μετώπου

Ιδιαίτερα ευαίσθητο σημείο που απαιτεί σωστή λειτουργική διαμόρφωση είναι η τομή του σωλήνα της τελικής επένδυσης της σήραγγας με το τοιχίο της πύλης του μετώπου του στομίου. Στις παλαιότερες σήραγγες με μεγάλο ύψος σε σχέση με το πλάτος, τα κατακόρυφα τοιχία των στομίων δεν ενοχλούν αισθητικά. Αντίθετα, στις σύγχρονες μικρότερου ύψους σήραγγες, με παρόμοιο πλάτος, τα κατακόρυφα τοιχία που δεν συγκλίνουν στον πόδα, ενοχλούν αισθητικά, καθώς τραυματίζουν την αίσθηση ορθής στατικής λειτουργίας. Η σήραγγα δεν είναι ούτε γέφυρα ούτε θόλος που στηρίζονται σε βάθρα, αλλά σωληνωτή κατασκευή, και αυτό θα πρέπει να αποτυπώνεται στα στόμια.

Τα στόμια των σηράγγων της κλασσικής εποχής των σιδηροδρόμων τόνιζαν την ένωση του θόλου με το μέτωπο. Τότε είχε επικρατήσει η τυπική λιθόκτιστη μορφή των στομίων, δανεισμένη από την αρχιτεκτονική των λιθοδομών της εποχής, που ταίριαζε, και ταιριάζει ακόμη, στην πεταλοειδή διατομή των σιδηροδρομικών σηράγγων. Αντίθετα, στις οδικές σήραγγες με τα πολύ πλατύτερα ανοίγματα δεν ικανοποιεί αυτή η μορφή πια, καθόσον ο επισκέπτης, στη θέση των λιθοδμήτων ορατών επιφανειών που ενώνονταν με το τοπίο, βλέπει μεγάλες μορφές από λεία τοιχία σκυροδέματος. Μόνον για περιορισμένο πλάτος οδού μπορεί η παλαιά μορφή στομίου να είναι σχετικά αποδεκτή. Όλες οι προηγούμενες διαμορφώσεις δεν έδιναν ποτέ την αίσθηση χωρικής στατικής λειτουργίας, που εξάλλου δεν ετίθετο παλαιότερα.

Η σύγχρονη αρχιτεκτονική τελευταία έβλεπε τη λύση στο απλό στόμιο με τις λιτές γραμμές και τις μεγάλες επίπεδες επιφάνειες. Στη συνέχεια απαιτήθηκε όπως τα στόμια, όπου είναι δυνατό, έχουν μόνο ορθές γωνίες. Μια τέτοια σκέψη απλοποίησης φαίνεται να ανταποκρίνεται στον ταξιδιώτη που δεν έχει χρόνο να παρατηρεί στο πέρασμά του και αντιλαμβάνεται μόνο περιγράμματα. Αντίθετα, μια τέτοια τεχνοτροπία κατασκευής δεν ανταποκρίνεται στον περιπατητή που παρατηρεί το τοπίο.

6.6.1.3 Γεωμετρική προσαρμογή στο ανάγλυφο

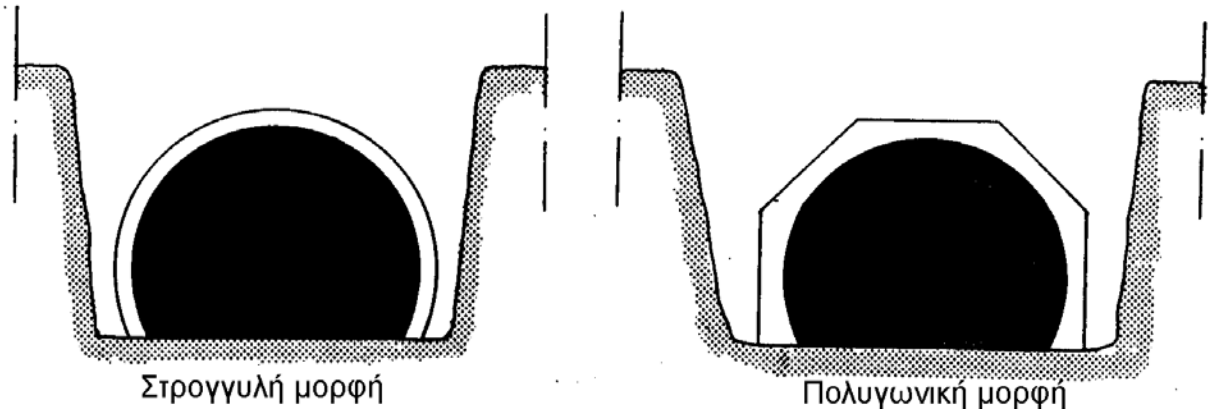
Εφόσον οι ογκώδεις κατασκευές των μετωπικών τοιχίων είναι κεκλιμένες, και επομένως πληρούν τις απαιτήσεις αντιστήριξης, η μορφή τους μπορεί να δρα πειστικά ειδικά αν το τοπίο είναι ιδιαίτερα απόκρημνο και η στήριξη προς την πλευρά της κοιλάδας θεμελιώνεται χαμηλότερα στο πρανές. Αντίθετα, οποιαδήποτε οριζόντια μορφή στέψης στομίου είναι αντιαισθητική. Τα περιγράμματα μάλιστα προς την πλευρά της κοιλάδας κρύβουν μέρος του τοπίου.

Οι ορθές γωνίες επίσης δεν αντιστοιχούν στατικά σε φορείς από σκυρόδεμα ή πέτρα (ως επένδυση), που έχουν μειωμένη δυνατότητα στην ανάληψη εφελκυστικών δυνάμεων. Αντίθετα, οι καμπύλοι φορείς, που λόγω της μορφής τους είναι κατάλληλοι για να αναλαμβάνουν θλιπτικές δυνάμεις, ταιριάζουν απόλυτα στα υλικά αυτά, και δένουν με το περιβάλλον. Εκτός αυτού, πλεονεκτούν στατικά, είναι όμως ακριβότεροι στην κατασκευή.

Η λοξή τοποθέτηση των στομίων δεν μειώνει μόνο το ύψος του τοιχίου και μαζί με αυτό σημαντικά και την ώθηση, αλλά διευκολύνει σημαντικά και την προσαρμογή στο τοπίο. Το μεγάλο ύψος στην τομή των τοιχίων λοξά προσπίπτουσας σήραγγας μπορεί να αποφευχθεί με λοξή τοποθέτηση του τοιχίου του μετώπου, και ακόμη περισσότερο με κοίλη διαμόρφωση των τοιχίων.

Από αισθητική άποψη ένα στόμιο, μαζί με το προ-όρυγμα, θα έπρεπε: να ταιριάζει στο συνολικό τοπίο και στο ανάγλυφο της περιοχής, να είναι προσαρμοσμένο στην αρχιτεκτονική της πόλης, χώρας, βιομηχανικής περιοχής, κλπ, να αντιστοιχεί στον χαρακτήρα της κυκλοφορίας, και να εκπροσωπεί το πνεύμα της εποχής. Στην ύπαιθρο οι στρογγυλεμένες μορφές είναι συνήθως οι καλύτερες. Ένα στόμιο που κλίνει προς τα πίσω, και διαμορφώνεται όπως μια χοάνη, δημιουργεί την εντύπωση μιας ευρύχωρης σήραγγας.

Ένα στόμιο σήραγγας διαμορφωμένο με ανατίναξη, χωρίς φορέα από σκυρόδεμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί όπου το πέτρωμα είναι ξηρό και σταθερό, και όπου το νερό της επιφάνειας δεν προκαλεί προβλήματα. Είναι το καταλληλότερο σε δρόμους με λίγη κυκλοφορία και όπου η είσοδος σηράγγων είναι τοποθετημένη μέσα στην υπάρχουσα φυσική επιφάνεια του βράχου.

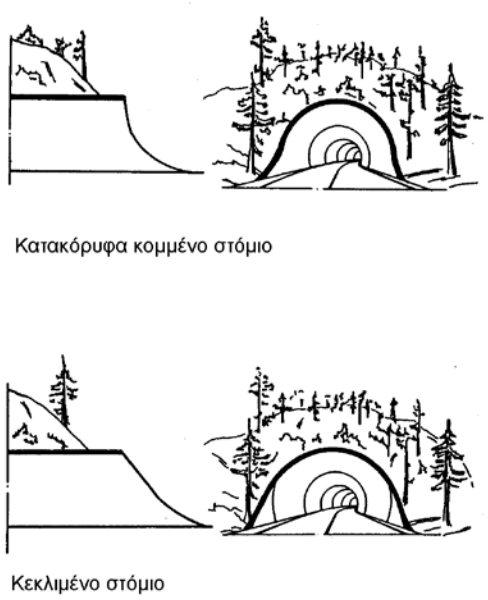


Σχήμα 6-26. Μορφή φορέα στομίου (Norwegian Design Guide, 1990)

Ένα στόμιο απευθείας κομμένο στο πέτρωμα δίχως περιθώρια (γείσο) και τοίχο μετώπου (Σχήμα 6-26) μπορεί να χρησιμοποιηθεί όπου ο βράχος είναι τόσο υγιής που δεν απαιτείται διαμόρφωση συγκράτησης καταπτώσεων, όπου όμως ένα στόμιο από σκυρόδεμα είναι επιθυμητό. Η λύση είναι κατάλληλη για κοντά στόμια.

Ένα ορθό ή μερικώς κεκλιμένο στόμιο (Σχήμα 6-27α, άνω) με περιθώρια από σκυρόδεμα, χρησιμοποιείται εκεί που απαιτείται ένα μαξιλάρι απορρόφησης ενέργειας. Το περιθώριο μπορεί να έχει μια μορφή χοάνης ή ενός τελειώματος από σκυρόδεμα γύρω από το άνοιγμα. Το τελείωμα πρέπει να έχει ύψος τουλάχιστον 0.25 m. για να κρύβει το μαξιλάρι. Το τελείωμα υπογραμμίζει το άνοιγμα της σήραγγας. Πρέπει επομένως να εναρμονίζεται με τη διατομή της σήραγγας και το ανάγλυφο.

Ένα κεκλιμένο στόμιο (Σχήμα 6-27α κάτω και β) είναι κατάλληλο στην περίπτωση απαίτησης επίχωσης. Το στόμιο πρέπει "να κοπεί" στην ίδια γωνία με την επίχωση που χρησιμοποιείται για την επικάλυψη. Η μορφή αυτή κάνει τη σήραγγα να φαίνεται λιγότερο περιορισμένη και δημιουργεί μια καλή μετάβαση από την ανοικτοσύνη της υπαίθρου στη σήραγγα. Η κλίση πρέπει να είναι μεταξύ 1:1.5 και 1:2. Το στόμιο πρέπει να επεκτείνεται 2 -3 m προς τα εμπρός από τη μάζα που το επικαλύπτει.



(α) Διαμόρφωση κλίσης



(β) Εξέχοντα κεκλιμένα στόμια με περιθώριο προστασίας στα άκρα σε κάθετα προσπίπτουσα χάραξη σε πολύ ήπιο πρανές

Σχήμα 6-27. Κεκλιμένα στόμια

6.6.2 Επιπτώσεις σε περιοχές υψηλής ή μέσης πυκνότητας δόμησης

Στις γειτονικές περιοχές θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη μελέτη:

- Τα υπάρχοντα και προγραμματισμένα κτήρια και δομήματα.
- Η υπάρχουσα και νέα βλάστηση.
- Οι άξονες της πόλης και άλλες οπτικές γραμμές.

Η γειτονική περιοχή πρέπει να παρέχει μία ήρεμη εικόνα στον οδηγό, του οποίου η προσοχή πρέπει να κατευθύνεται προς την είσοδο της σήραγγας.

6.7 Δράσεις κατά το σχεδιασμό στομίων σηράγγων

Παρακάτω δίνεται η γενική οδηγία για το σχεδιασμό στομίου σήραγγας σύμφωνα με την πρόταση ιταλικού εθνικού προγράμματος (NPDCSUW, 1997). Τα βήματα είναι οργανωμένα στα παρακάτω έξι σημεία κλειδιά (Peila and Pelizza, 2002) που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη από τη μελέτη.

6.7.1 Τοπίο και περιβαλλοντική ανάλυση (Pelizza et al, 1998)

α. Αξιολόγηση της κατάστασης του τοπίου, του γενικού αρχιτεκτονικού περιβάλλοντος, των τοπικών νόμων και ειδικών περιορισμών, και των κοινωνικών πτυχών.
β. Αξιολόγηση των τεχνικών αναγκών της σήραγγας (εξαερισμός κλπ).
γ. Αρχιτεκτονική επιλογή, με χρήση πιθανώς πολυκριτηριακής ανάλυσης, μεταξύ απόκρυψης ή έμφασης του στομίου.
δ. Αξιολόγηση της επίδρασης στο περιβάλλον της προκαταρκτικά επιλεγμένης λύσης.

6.7.2 Έρευνα υπεδάφους

α. Γεωλογική και γεωτεχνική διερεύνηση με ειδική αναφορά στις γεωτεχνικές ιδιότητες που είναι σημαντικές για κατολισθήσεις, συνθήκες υπόγειου νερού και βραχοπτώσεις.
β. Σεισμικές συνθήκες της περιοχής

6.7.3 Επιφανειακοί και υπόγειοι περιορισμοί

α. Καθορισμός των μετατοπίσεων, λόγω της κατασκευής των στομίων των σηράγγων, που είναι αποδεκτές για τα δομήματα στην επιφάνεια.
β. Εξέταση της επιρροής των στομίων στην επιφανειακή και υπόγεια υδραυλική τόσον κατά τη διάρκεια της κατασκευής (μελέτη των προσωρινών διαμορφώσεων) όσον και κατά τη λειτουργία (μελέτη της μόνιμης διαμόρφωσης)

6.7.4 Πρόβλεψη μηχανικής συμπεριφοράς της γεωμάζας

α. Μεγάλης κλίμακας κατολισθήσεις. Αξιολογούνται οι κρίσιμες παράμετροι (νερό, κλπ) και η επιρροή τους, και καθορίζονται οι συντελεστές ασφάλειας με και χωρίς το στόμιο.
β. Μικρές κατολισθήσεις. Αξιολογούνται οι κρίσιμες παράμετροι (νερό, κλπ) και η επιρροή τους, καθορίζονται οι συνθήκες του κινδύνου, και μελετώνται οι τεχνικές σταθεροποίησης και ο προκύπτων συντελεστής ασφάλειας.
γ. Κίνδυνος χιονοστιβάδας. Καθορίζονται οι συνθήκες του κινδύνου και μελετώνται τα μέτρα προστασίας.
δ. Βραχοπτώσεις. Αξιολογούνται τα πιθανά σημεία αποσύνδεσης τεμαχών, το μέγεθός τους, οι τροχιές τους και οι ταχύτητά τους. Καθορίζονται οι συνθήκες κινδύνου. Επιλέγονται τα μέτρα προστασίας τόσον κατά τη διάρκεια της κατασκευής όσον και κατά τη φάση λειτουργίας. Αξιολογούνται οι τροχιές και η ενέργεια κρούσης. Εκτιμάται ο συντελεστής ασφαλείας των ασταθών τεμαχών. Μελετώνται τα ενεργητικά και παθητικά μέτρα προστασίας (εφόσον επιλεγεί η τεχνητή σήραγγα, τα στοιχεία που λαμβάνονται σε αυτό το βήμα πρέπει να ληφθούν υπόψη στο παρακάτω σημείο 7.6).
ε. Προκαταρκτική μελέτη του στομίου και αξιολόγηση των διάφορων πιθανών μεθόδων κατασκευής.

6.7.5 Αρχιτεκτονική και περιβαλλοντική μελέτη

α. Οριστική αρχιτεκτονική και περιβαλλοντική μελέτη. Αρχιτεκτονική μελέτη της τελικής λύσης του στομίου με μελέτη και χωροθέτηση των κτηρίων υποστήριξης της λειτουργίας της σήραγγας. Σχεδιασμός της τελικής αποκατάστασης. Επιλογή και διαθεσιμότητα των δομικών υλικών. Επιλογή των τεχνικών κάλυψης με χορτάρι και της φύτευσης κατάλληλων δέντρων. Αξιολόγηση των περιβαλλοντικών και οπτικών επιπτώσεων των κατασκευών προστασίας από βραχοπτώσεις.
β. Αξιολόγηση των βοηθητικών έργων (προσβάσεις, εργοτάξια, κλπ) και των συνυφασμένων περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Μελέτη των έργων αποκατάστασης.

6.7.6 Επιλογή της μεθόδου μελέτης και υπολογισμοί

α. Γεωστατική μελέτη. Μελέτη των τεχνικών ενίσχυσης (π.χ. αγκύρια), υπολογισμός του βραχυπρόθεσμου συντελεστή ασφάλειας, υπολογισμός του μακροπρόθεσμου συντελεστή ασφάλειας, επιλογή και μελέτη των τεχνικών εκσκαφής (ανατινάξεις, μηχανική εκσκαφή, κλπ), επιλογή και μελέτη των τεχνικών σταθεροποίησης για μεγάλες κατολισθήσεις, υπολογισμός του συντελεστή ασφάλειας που λαμβάνει υπόψη το στόμιο της σήραγγας.
β. Δομοστατική μελέτη του στομίου. Μελέτη της θεμελίωσης. Στατική μελέτη που λαμβάνει υπόψη την επιρροή των τεχνικών ενίσχυσης, Υπολογισμός του συντελεστή ασφάλειας για κάθε φάση επίχωσης.

Βιβλιογραφία

DIN 67524. -1, Ausgabe:1987-05, “Beleuchtung von Straßentunnels und Unterführungen; Allgemeine Gütemerkmale und Richtwerte”; -2, Ausgabe:1992-08 “Beleuchtung von Straßentunnels und Unterführungen; Berechnung und Messung”.

Edwards JH and Graham DR (1970). “The Claremont to Danville road tunnel”, South African Tunneling Conference, Vol. I, pp. 237-241.

FE.S.P.I. (1992). High speed railway line Roma – Firenze.

John KW (1957). “Tunnelportale im Widerstreit der Meinungen”, Brucke und Strasse, JG. 9, H. 4.

Lacroix D, Marsault JP, Geffroy G, Vialettes J (1991). “Architecture des tetes de tunnels”, Centre d’ Etudes des Tunnels (CETU), Ministere de l’ Equipement du Logement des Transports et de l’ Espace, Direction des Routes, Villars.

Muller L und Pacher F (1961). “Das Nordportal des Klammsteintunnels”, Geol. u. Bauw., Jg. 26, H. 2, pp. 87-92.

Muller L. (1978). “Der Felsbau – Dritter Band: Tunnelbau”, Enke

Norwegian Design Guide (1990). “Road Tunnels”, Public Roads Administration, Norway.

NPDCSUW (1997). (National Project for Design and Construction Standards in Underground Works, promoted by AGI, ANIM, GEAM, IAEG, ITCOLD, SIG, SIGI) “Guidelines for design. Tendering and construction of underground works”. Gallerie e grandi opere sotterranee, 51.

Pacher F (1974). “Zur Sicherung grosser Tunnelvoreinschnitte”, Rock Mech., Suppl. 3, pp. 79-88.

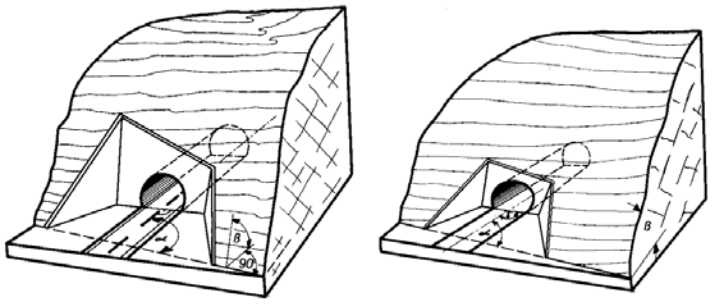
Peila D. and Pelizza S. (2002). “Criteria for technical and environmental design of tunnel portals”, TUST, 17, 335-340.

Pelizza S, Peila D, Langella L (1998). “Architectural and landscape evaluation of tunnel portals”, World Tunnel Congress, Tunnels and Metropolises, Sao Paolo, Brazil.

Κριτήρια αξιολόγησης

Κριτήριο αξιολόγησης 1

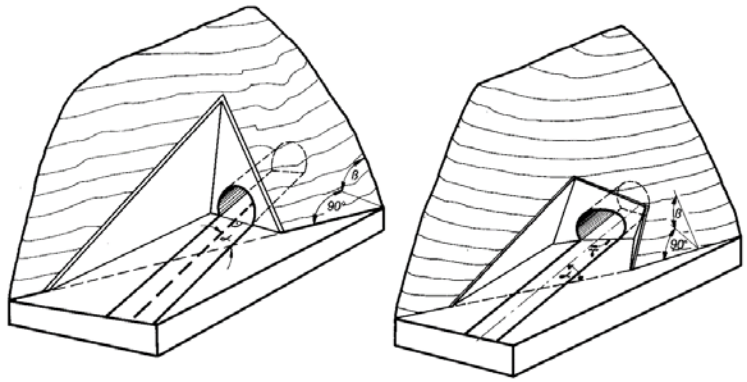
Σχεδιάστε, σύμφωνα με το επόμενο σκαρίφημα, την εγκάρσια τομή του ορύγματος στο μέτωπο και τη μηκοτομή σήραγγας διαμέτρου εκσκαφής 10m, στον άξονά της για σχεδόν κάθετη πρόσπτωση της χάραξης σε απότομο πρανές, και υπολογίστε το μέγιστο ύψος του ορύγματος, καθώς και τους όγκους εκσκαφής, για:
(α) μέτωπο κάθετο στον άξονα
(β) μέτωπο λοξό στον άξονα.



α. Μέτωπο κάθετο στον άξονα β. Μέτωπο λοξό στον άξονα

Κριτήριο αξιολόγησης 2

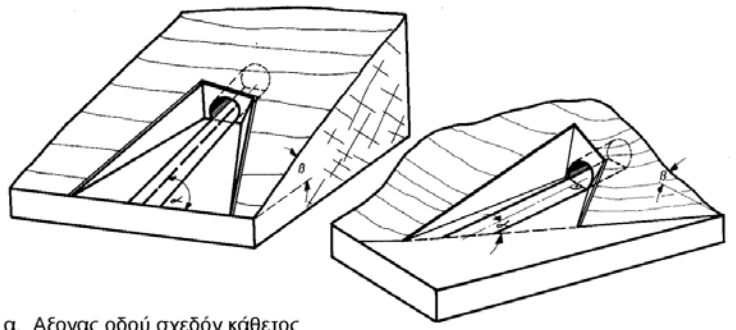
Σχεδιάστε, σύμφωνα με το επόμενο σκαρίφημα, την εγκάρσια τομή του ορύγματος στο μέτωπο και τη μηκοτομή σήραγγας διαμέτρου εκσκαφής 10m, στον άξονά της για λοξή πρόσπτωση της χάραξης σε απότομο πρανές, και υπολογίστε το μέγιστο ύψος του ορύγματος, καθώς και τους όγκους εκσκαφής, για:
(α) μέτωπο κάθετο στον άξονα
(β) μέτωπο λοξό στον άξονα.



α. Μέτωπο κάθετο στον άξονα β. Μέτωπο λοξό στον άξονα

Κριτήριο αξιολόγησης 3

Σχεδιάστε, σύμφωνα με το επόμενο σκαρίφημα, την εγκάρσια τομή του ορύγματος στο μέτωπο και τη μηκοτομή σήραγγας διαμέτρου εκσκαφής 10m, στον άξονά της για πρόσπτωση χάραξης σε ήπιο πρανές, και υπολογίστε το μέγιστο ύψος του ορύγματος, καθώς και τους όγκους εκσκαφής, για:
(α) άξονα της οδού σχεδόν κάθετο στην παράταξη του πρανούς
(β) άξονα της σήραγγας σε οξεία γωνία με την παράταξη του πρανούς.



α. Αξονας οδού σχεδόν κάθετος στην παράταξη του πρανούς

β. Αξονας σήραγγας σε οξεία γωνία με την παράταξη του πρανούς

Κριτήριο αξιολόγησης 4

Σχεδιάστε, τις ωθήσεις και τις τάσεις μετατόπισης χαλαρών σχηματισμών πέριξ μετώπου οδικής σήραγγας αυτοκινητοδρόμου, για κάθετη προσβολή ήπιων πρανών.

Θέμα

Τμήμα της νέας οδοποιίας του Βόρειου οδικού άξονα Κρήτης, μεταξύ Χερσονήσου και ορίων Νομού Λασιθίου, στην περιοχή Σταλίδα, κατασκευάζεται σε σήραγγα και εκτείνεται από τη Χ.Θ. 1+443 (είσοδος - Βόρειο στόμιο) έως τη Χ.Θ. 1+860,18 (έξοδος - Νότιο στόμιο).

Σύμφωνα με τη γεωλογική χαρτογράφηση και τα αποτελέσματα της γεωτρητικής έρευνας που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια των εδαφοτεχνικών μελετών, στην περιοχή κατασκευής του έργου, συνάγεται ότι στις περιοχές διαμόρφωσης των στομίων της σήραγγας αναπτύσσονται οι ανθρακικοί σχηματισμοί της γεωτεκτονικής ενότητας της Τρίπολης. Ειδικότερα, στην περιοχή διαμόρφωσης του στομίου εισόδου συναντώνται οι κρητιδικοί ασβεστόλιθοι (kt), οι οποίοι στη συγκεκριμένη θέση έχουν άστρωτη δομή, είναι μικροκρυσταλλικοί και έχουν χαρακτηριστικό τεφρό έως γκριζότεφρο χρώμα. Παρουσιάζουν μέτρια και τοπικά έντονη καρστικοποίηση. Στην περιοχή όπου θα διαμορφωθεί το στόμιο εξόδου αναμένεται να συναντηθεί ο σχηματισμός του ασβεστολιθικού λατυποπαγούς, το οποίο χαρακτηρίζεται από έντονο τεκτονισμό και καταπόνηση. Σύμφωνα με τη γεωλογική μελέτη, στην περιοχή του έργου διαπιστώνεται σημαντικός τεκτονισμός. Υπερκείμενα στο αλπικό υπόβαθρο επικάθονται χαλαρά κορηματικά υλικά όπως ελουβιακός μανδύας (EL) των ασβεστολίθων στην περιοχή εισόδου της σήραγγας και κορηματικά υλικά (SC, PS) στην περιοχή εξόδου.

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που συναντώνται στις περιοχές διαμόρφωσης των στομίων της σήραγγας αξιολογούνται ως προς την τεχνικογεωλογική συμπεριφορά τους και διακρίνονται στις ακόλουθες επιμέρους τεχνικογεωλογικές ενότητες:

- ***Ελουβιακός μανδύας (EL)***

Αποτελεί χαλαρό εδαφικό μανδύα, ο οποίος προέρχεται από την αποσάθρωση των ασβεστολίθων. Η σύστασή του είναι κυρίως αργιλική και έχει καστανοκόκκινο χρώμα. Το πάχος του είναι μικρό 1,5m – 3,0m. Ο σχηματισμός αυτός θα συναντηθεί κατά την κατασκευή του στομίου εισόδου της σήραγγας.

- ***Κρητιδικοί ασβεστόλιθοι (kt)***

Ο εν λόγω γεωλογικός σχηματισμός αναμένεται να συναντηθεί κατά μήκος του μεγαλύτερου τμήματος της σήραγγας. Παρουσιάζει κυρίως άστρωτα και τοπικά παχυστρωματώδη χαρακτηριστικά, με χαρακτηριστικό τεφρό έως γκριζότεφρο χρώμα. Είναι συνήθως μικροκρυσταλλικοί και στη μάζα τους παρατηρούνται φλεβίδια ασβεστίτη. Τοπικά είναι ενδεχόμενο να συναντώνται ζώνες ασβεστιτικού υλικού πάχους της τάξης έως και 1m.

Στο σύνολό τους είναι κερματισμένοι και οι ασυνέχειές τους είναι συνήθως πληρωμένες με ασβεστιτικό υλικό. Τοπικά αναμένεται έντονος κατακερματισμός κυρίως σε γειτνίαση με ρηξιγενείς ζώνες και οι ασυνέχειες έχουν αργιλικό υλικό πλήρωσης. Επιφανειακά, ο εν λόγω σχηματισμός παρουσιάζει αποσάθρωση, οι ασυνέχειες έχουν μεγαλύτερο άνοιγμα και είναι συνήθως πληρωμένες με αργιλικό υλικό. Κρίνεται ως σχηματισμός υψηλής αντοχής με καλά μηχανικά χαρακτηριστικά.

- ***Ασβεστολιθικό λατυποπάγες (bk)***

Ο σχηματισμός αυτός προέρχεται κυρίως από τεκτονικά αίτια. Ανήκει γεωλογικά στο σχηματισμό των κρητιδικών ασβεστολίθων, διαχωρίζεται όμως τεχνικογεωλογικά εφόσον παρουσιάζει διαφοροποίηση των φυσικομηχανικών χαρακτηριστικών του. Αναμένεται να συναντηθεί από τη Χ.Θ. 1+735 περίπου έως την έξοδο της σήραγγας. Αποτελεί ανομοιόμορφο σχηματισμό και συνίσταται κυρίως από λατύπες, μικρού έως μέτριου μεγέθους, τεφρού κρητιδικού ασβεστολίθου. Το συνδετικό υλικό του λατυποπαγούς είναι αργιλικό ή ασβεστιτικό, το οποίο τοπικά είναι πολύ συνεκτικό. Στη μάζα του συναντώνται ζώνες έντονου κατακερματισμού στις οποίες είναι απομειωμένα τα μηχανικά χαρακτηριστικά του σχηματισμού και στις οποίες υπάρχει έντονη συμμετοχή του αργιλικού υλικού. Όπως προκύπτει από την παρατήρηση υφιστάμενων πρανών στην ευρύτερη περιοχή του έργου, στο σχηματισμό του ασβεστολιθικού λατυποπαγούς συναντώνται αργιλικές ζώνες ή ασβεστολιθικές ζώνες.

Βάσει της γεωλογικής μελέτης εκτιμάται ότι οι σχηματισμοί που δομούν την περιοχή ενδιαφέροντος και ιδιαίτερα οι κρητιδικοί ασβεστόλιθοι χαρακτηρίζονται από υψηλή διαπερατότητα. Η κυκλοφορία του νερού διενεργείται μέσω του δευτερογενούς πορώδους, δηλαδή του πυκνού δικτύου ασυνεχειών της βραχόμαζας, ήτοι ασυνέχειες, ρήγματα κλπ, καθώς και του ανεπτυγμένου καρστικού δικτύου. Στα κατάντη της περιοχής μελέτης εκδηλώνονται υποθαλάσσιες πηγές μικρής εκτιμώμενης παροχής γεγονός το οποίο δείχνει την υδρομαστευτική ικανότητα των ασβεστολιθικών σχηματισμών και τη μεγάλη διαπερατότητά τους. Κατά συνέπεια σε ότι αφορά το εν λόγω έργο δεν αναμένεται η ανάπτυξη υδροφόρου ορίζοντα.

Σύμφωνα με τα στοιχεία της γεωλογικής μελέτης, όπου αξιολογούνται τα συναφή στοιχεία και λαμβάνεται υπόψη η συνολική υδρογεωλογική εικόνα της ευρύτερης περιοχής, συνάγεται ότι στην περιοχή της σήραγγας δεν διαμορφώνεται υδροφόρος ορίζοντας. Ωστόσο, σημειώνεται ότι κατά την κατασκευή αναμένεται, περιορισμένα, διήθηση όμβριων υδάτων μέσω των ασυνεχειών της βραχόμαζας.

Οι ισοϋψείς των περιοχών των στομίων εισόδου και εξόδου δίνονται στο *Σχήμα 6-28*α και στο *Σχήμα 6-28*β, αντίστοιχα, οι δε διατομές στα στόμια εισόδου και εξόδου δίνονται στο *Σχήμα 6-28*γ και στο *Σχήμα 6-28*δ, αντίστοιχα.

ΖΗΤΟΥΜΕΝΑ

Ο καθορισμός της θέσης του στομίου εισόδου της σήραγγας (να επιλέξετε μία εκ των τριών διατομών που επισυνάπτονται), και

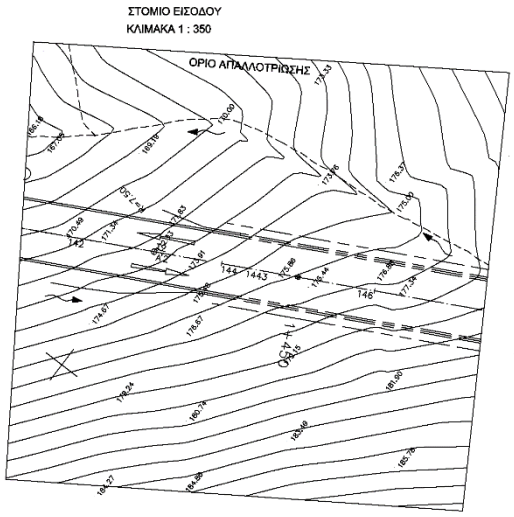
Ο καθορισμός της γεωμετρίας της εκσκαφής αναλυτικά επί των διαθεσίμων σχεδίων οδοποιίας (οριζοντιογραφία, διατομές), λαμβάνοντας υπόψη τους εξής παράγοντες:

Τη μορφολογία της περιοχής, όπως αποτυπώνεται στα συνημμένα σχέδια (οριζοντιογραφία, διατομές οδού).

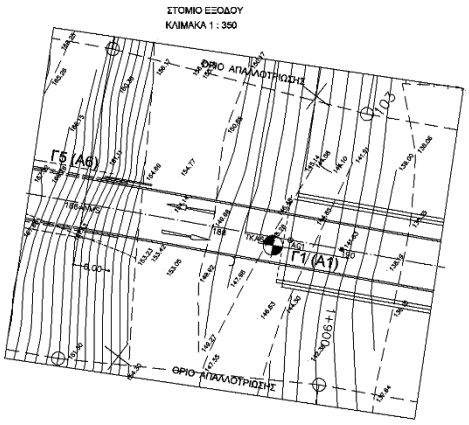
Το ελάχιστο υπερκείμενο από τη στέψη της σήραγγας μέχρι την επιφάνεια του εδάφους πρέπει να είναι περίπου 5 m.

Το δάπεδο της εκσκαφής στην περιοχή των στομίων πρέπει να διαμορφωθεί σε βάθος 1.65 m ως προς το υψόμετρο της ερυθράς σε κάθε θέση.

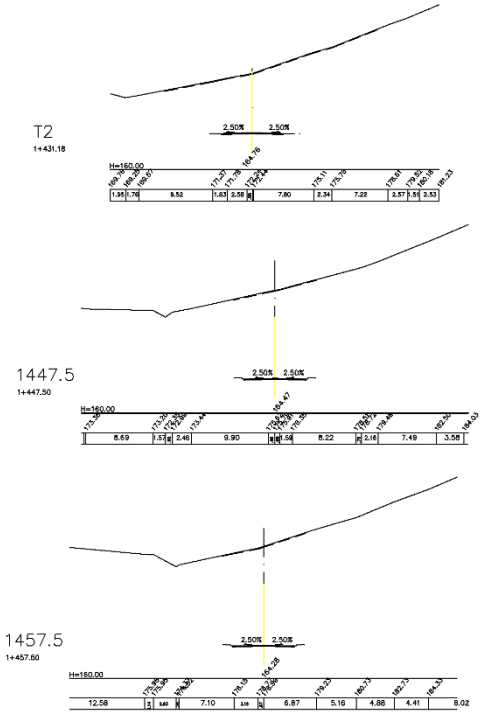
Τα πλευρικά πρανή να διαμορφωθούν σε μία ή περισσότερες βαθμίδες με ενδιάμεσο αναβαθμό και μέγιστες κλίσεις που καθορίζονται από τη φύση του πετρώματος στις περιοχές κατασκευής των στομίων. Οι μέγιστες κλίσεις πρανών ορυγμάτων (υ:β), που επιτρέπονται, είναι: σε γαίες 1:1, σε ημίβραχο 2:1, και σε βράχο 3:1. Διάφοροι περιορισμοί επιβάλλουν το μέγιστο ύψος των βαθμίδων να μην υπερβαίνει τα 11 m.



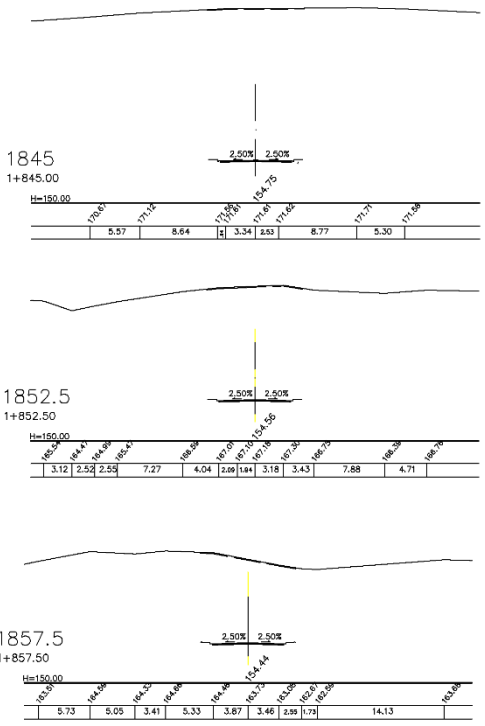
(α) Στόμιο εισόδου



(β) Στόμιο εξόδου



(γ) Διατομές στομίου εισόδου



(δ) Διατομές στομίου εξόδου

Σχήμα 6-28. Περιοχή στομίων σήραγγας

Κεφάλαιο 7

Σύνοψη
Πρόκειται για διάνοιξη από μηχανές (TBM) που διατρούν ισχυρά πετρώματα, τα οποία τους επιτρέπουν ισχυρή πάκτωση στα τοιχώματα. Αναπτύσσονται οι τύποι των μηχανών, η λειτουργία τους, οι παράγοντες επιλογής τους, οι απαιτούμενες δυνάμεις προχώρησης, και η επίδοσή τους. Η εμπέδωση επιτυγχάνεται με λυμένα παραδείγματα και ασκήσεις.

Προαπαιτούμενη γνώση
Μαθήματα: Εξόρυξη πετρωμάτων, Μηχανική των πετρωμάτων, Υποστήριξη Υπογείων Έργων. Χρήσιμη βιβλιογραφία: Maidl et al. (2008).

7. Εκμηχανισμένη διάνοιξη από μηχανές κύριας δοκού

7.1 Εισαγωγή

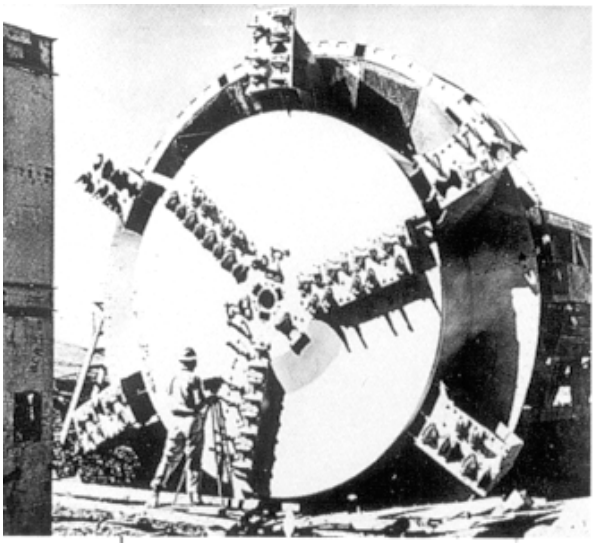
Η ανάγκη για εκμηχανισμένη κατασκευή μιας μεγάλου μήκους σήραγγας και για αποφυγή των δονήσεων από ανατινάξεις όταν πραγματοποιείται σε αστική περιοχή, αποτελούν σημαντικούς λόγους για την επιλογή μιας μεθόδου διάνοιξης από μηχανή ολομέτωπης διάτρησης (Tunnel Boring Machine - TBM). Πρόκειται για κινητές βιομηχανικές μονάδες στις οποίες, αντί των συμβατικών κύκλων διάνοιξης με σειριακές εργασίες εκσκαφής ή διάτρησης-ανατίναξης, ξεσκαρώματος, αποκόμισης των μπαζών και υποστήριξης, οι αντίστοιχες εργασίες τείνουν να πραγματοποιούνται αυτοματοποιημένα και ταυτόχρονα. Τέτοιες μηχανές υποκαθιστούν όλο και περισσότερο τις συμβατικές μεθόδους διάνοιξης.

Το μπροστινό μέρος του TBM είναι μία περιστρεφόμενη κοπτική κεφαλή, με διάμετρο γενικά από 3 έως 15 m, που ταιριάζει στη διάμετρο της σήραγγας. Στην κοπτική κεφαλή είναι στερεωμένοι κοπτικοί δίσκοι, διαμέτρου από 11" έως 20", τοποθετημένοι έτσι ώστε να επιτυγχάνουν τη βέλτιστη διάτρηση του πετρώματος. Καθώς περιστρέφεται η κοπτική κεφαλή, υδραυλικά έμβολα ωθούν, μέσω της κεφαλής, τα κοπτικά στο πέτρωμα. Η μεταφορά αυτής της υψηλής ώσης μέσω των κυλιόμενων δίσκων δημιουργεί ρωγματώσεις στο βράχο προκαλώντας αποκόλληση θραυσμάτων από το μέτωπο της σήραγγας. Η στήριξη του μετώπου από καταπτώσεις, εφόσον απαιτείται, επιτυγχάνεται από την ίδια την κοπτική κεφαλή. Οι μηχανές αυτές δύνανται να περιβάλλονται από μικρή ασπίδα στο πρόσθιο τμήμα της μηχανής που προστατεύει το χώρο αυτό από καταπτώσεις του περιβάλλοντος πετρώματος. Ένα σύστημα ωστήρων (grippers) πακτώνει τη μηχανή άμεσα στα πλευρικά τοιχώματα, ενώ τα έμβολα ώσης εκτείνονται, επιτρέποντας στην κύρια δοκό την προώθηση του TBM. Κάδοι (buckets) στην περιστρεφόμενη κοπτική κεφαλή μαζεύουν και αποθέτουν τα μπάζα σε έναν ιμάντα μεταφοράς στο εσωτερικό της κύριας δοκού. Τα μπάζα στη συνέχεια μεταφέρονται στο πίσω μέρος της μηχανής για αποκόμιση από τη σήραγγα. Στο τέλος της διαδρομής των εμβόλων ώσης η μηχανή επανατοποθετείται για τον επόμενο κύκλο διάτρησης. Ο ανοικτός σχεδιασμός των TBM κύριας δοκού επιτρέπει τη γρήγορη πρόσβαση ακριβώς πίσω από τη κεφαλή κοπής για την εγκατάσταση της υποστήριξης με ήλους, πλέγματα, χαλύβδινα τόξα, κλπ., γεγονός που τα καθιστά ιδανική λύση για ανεπένδυτες σήραγγες. Πρόκειται για τυπικές μηχανές βράχου με κατάλληλο πεδίο εφαρμογής ποιότητες πετρώματος από πολύ καλό-ισχυρό έως μέτριο-ελαφρά διακλασμένο Η επιλογή του κατάλληλου μηχανήματος βασίζεται κυρίως στην ποιότητα του πετρώματος, αλλά και σε κριτήρια οικονομικά ή διαθεσιμότητας της μηχανής.

Οι μηχανές ολομέτωπης κοπής αναπτύχθηκαν αρχικά για την εκσκαφή μαλακών σχηματισμών. Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας επεκτάθηκε η χρήση των μηχανών αυτών σε σκληρά πετρώματα, έτσι ώστε ο χαρακτηρισμός του βράχου να απαιτεί αναθεώρηση. Η ανάπτυξη των μηχανών αυτών έχει σα συνέπεια στα μεγαλύτερα τεχνικά έργα διάνοιξης σηράγγων να επιλέγεται σαν πρώτη λύση η εκσκαφή με μία τέτοια μηχανή, εκτός εάν η σκληρότητα του πετρώματος ξεπερνά τις δυνατότητες των κοπτικών της μηχανής.

7.1.1 Ιστορικά στοιχεία

Οι μηχανές αυτές αναπτύχθηκαν αρχικά στις ΗΠΑ για τη διάνοιξη ευσταθών πετρωμάτων. Η πρώτη μηχανή κατασκευάσθηκε από τον J. Wilson στις U.S.A. το 1856. Δοκιμάσθηκε ανεπιτυχώς, αφού διέτρησε μόλις 3 μέτρα, στη σιδηροδρομική σήραγγα του Hoosac που έχει μήκος 4.7 μίλια και η κατασκευή της απαίτησε 21 χρόνια. Η πραγματική ανάπτυξη των μηχανών αυτών άρχισε στα 1950 από τον J. Robbins, και η πρώτη επιτυχής εφαρμογή έγινε από μηχανή του στο φράγμα Oahe το 1952 (Σχήμα 7-1α). Οι μηχανές είναι γενικά κυκλικές (Σχήμα 7-1β) με διαμέτρους που ξεκινούν από 2.5m και ξεπερνούν τα 12m



(α) Μηχανή Robbins στο έργο του φράγματος του Oahe, το 1952



(β) Σύγχρονη μηχανή της Wirth

Σχήμα 7-1. Μηχανές ολομέτωπης κοπής

7.1.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή ΤΒΜ

Οι περισσότερες συμβάσεις της σηραγγοποιίας προσφέρονται ανταγωνιστικά, το δε οικονομικό κόστος σε αυτές εξαρτάται από την τοποθεσία και δεν γενικεύεται Η απόφαση επομένως εάν πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα ΤΒΜ αφήνεται συνήθως στον ανάδοχο, αν και οι προδιαγραφές προσφοράς μπορεί να κλίνουν προς ή αντίθετα στη χρήση μιας μηχανής. Εάν βέβαια ο κύριος του έργου αισθάνεται ότι σαφώς απαιτείται η χρήση ενός ΤΒΜ, μπορεί να απαιτήσει τη χρήση του. Σε ένα ιδιωτικά χρηματοδοτούμενο έργο, το κόστος επιτοκίου κατά τη διάρκεια της κατασκευής και η ανάγκη για γρήγορα έσοδα μπορεί να ληφθούν σοβαρότερα υπόψη από τις δαπάνες κατασκευής.

Τα ΤΒΜ με ωστήρες πάκτωσης είναι κατάλληλα για χρήση σε σκληρά πετρώματα με μέτριο προς υψηλό χρόνο ευστάθειας. Ο χρόνος αυτός είναι ιδιαίτερα επιτακτικός στις θέσεις συντήρησης ή αλλαγής κοπτικών, όπου η κοπτική κεφαλή οπισθοχωρεί από το μέτωπο και παύει να προσφέρει οποιαδήποτε υποστήριξη και να το συγκρατεί. Η ικανότητα κοπής του πετρώματος αντοχής μέχρι και 300 MPa επιτρέπει τη χρησιμοποίησή τους στα περισσότερα σκληρά πετρώματα.

Το υψηλότερο κόστος επένδυσης της διάνοιξης με ΤΒΜ, σε σύγκριση με τη συμβατική, μπορεί να αντισταθμιστεί μόνο με τον υψηλότερο ρυθμό προχώρησης σε συνδυασμό με ένα μεγάλο μήκος σήραγγας. Αν όμως ο ρυθμός φθοράς των κοπτικών αυξάνεται πολύ λόγω της σκληρότητας του πετρώματος ή άλλων αρνητικών παραγόντων, η συχνή αλλαγή τους μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλα χρονικά διαστήματα διακοπής. Αυτό μειώνει σημαντικά τον ενεργό χρόνο εργασίας και επομένως την απόδοση της μηχανής. Αρνητικά επηρεάζουν το ρυθμό προχώρησης τα πρόσθετα μέτρα στήριξης που απαιτούνται σε ζώνες ρηγμάτων και η περιορισμένη αποτελεσματικότητα της πάκτωσης των ωστήρων. Η μείωση του πραγματικού χρόνου λειτουργίας της μηχανής μπορεί να μειώσει την απόδοση της τόσο ώστε να μην είναι πλέον οικονομικά συμφέρουσα η επιλογή της. Η απόφαση χρησιμοποίησης ενός ΤΒΜ απαιτεί καλή γεωλογική έρευνα και λεπτομερή σχεδιασμό της διάτρησης και υποστήριξης. Επίσης, τα ΤΒΜ θέτουν περιορισμούς στη μορφή της

διαδρομής, η οποία δεν μπορεί να ακολουθεί ιδιαίτερα κλειστές καμπύλες. Παρακάτω απαριθμούνται μερικοί από τους παράγοντες που επηρεάζουν έναν ανάδοχο στην απόφασή αν πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα ΤΒΜ.

7.1.2.1 Παράγοντες που ευνοούν την επιλογή ΤΒΜ

- Επαρκή γεωλογικά στοιχεία, καθόσον ένα ΤΒΜ δεν μπορεί να ανταποκρίνεται σε ποικιλία γεωλογικών συνθηκών.
- Έγκαιρα γεωλογικά στοιχεία, που πρέπει να είναι πλήρη πριν από την έκδοση της πρόσκλησης για προσφορά.
- Γεωλογικά στοιχεία που δείχνουν σχετική ομοιομορφία της ποιότητας και της συμπεριφοράς του πετρώματος σε όλη τη διάνοιξη.
- Χαμηλή έως μέτρια αναμενόμενη εισροή νερών, βασισμένη κατά προτίμηση σε δοκιμές άντλησης με ποσοτική, παρά ποιοτική, εκτίμηση.
- Πέτρωμα όχι υπερβολικά σκληρό ή λειαντικό.
- Κυκλική διατομή της σήραγγας ή της στέψης. Μια μη κυκλική διατομή, όπως ένα πέταλο με κυκλική στέψη, μπορεί συνήθως να διανοιχτεί κυκλικό και να διευρυνθεί στη συνέχεια με μηχανική σφύρα ή με διάτρηση ανατίναξη.
- Διάνοιξη από ένα μέτωπο, εκτός αν το μέγεθος της σήραγγας ευνοεί τη χρήση και δεύτερου ΤΒΜ.
- Η πρόσβαση από στόμιο παρά από φρέαρ (Σχήμα 7-2) ευνοεί το ΤΒΜ για μεγάλες διαμέτρους σηράγγων, όπου τα βαριά τμήματα του ΤΒΜ πρέπει να κατέβουν στην στάθμη της σήραγγας για να συναρμολογηθούν υπόγεια. Ένα στόμιο επιτρέπει τη συναρμολόγηση του ΤΒΜ έξω από τη σήραγγα, που αποτελεί ένα ευδιάκριτο πλεονέκτημα στο κόστος και στο χρονοδιάγραμμα.
- Μακριές σήραγγες. Η διάνοιξη πρέπει να είναι αρκετά μεγάλου μήκους, γενικά πάνω από 1000m, ώστε να επιτρέπει τις μεγάλες αρχικές δαπάνες για την αγορά του ΤΒΜ.
- Διαθεσιμότητα του απαιτούμενου τύπου και της σωστής διαμέτρου ΤΒΜ.
- Κατά τη διάρκεια της διάνοιξης, θα πρέπει να είναι εξασφαλισμένη η καλή συντήρησή του ΤΒΜ, καθώς η απόδοσή του πρέπει να διατηρείται μέχρι το τέλος της διάνοιξης.
- Διαθεσιμότητα ειδικευμένης εργασίας. Τα ΤΒΜ απαιτούν διαφορετικές δεξιότητες από εκείνες για τις άλλες τεχνικές της σηραγγοποιίας.
- Έτοιμες πηγές επαρκούς ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα ΤΒΜ μπορεί να απαιτήσει εγκατεστημένη ισχύ 5MW.



(α) Πρόσβαση από στόμιο. Συρμός ΤΒΜ της Robbins πριν τη διάνοιξη υδραυλικής σήραγγας στα υψίπεδα του Lesotho. Για την αντιμετώπιση κερματισμένων πετρωμάτων έχει εσχάρα ράβδων πέριξ της κοπτικής κεφαλής μεταξύ των περιφερειακών κάδων



(β) Πρόσβαση από φρέαρ κοπτικής κεφαλής της Robbins

Σχήμα 7-2. Πρόσβαση ΤΒΜ

7.1.2.2 Παράγοντες που αποτρέπουν την επιλογή ΤΒΜ

- Ανεπαρκείς ή μη πειστικές γεωλογικές πληροφορίες.
- Εκσκαφή μικτού μετώπου ή πιθανότητα αυτής
- Περιοχές με τεκτονικά ρήγματα. Σε αυτήν την περίπτωση ένα ΤΒΜ μπορεί να παγιδευτεί από μετατόπιση του πετρώματος πίσω από το μέτωπο.
- Μικρός χρόνος ευστάθειας του πετρώματος.

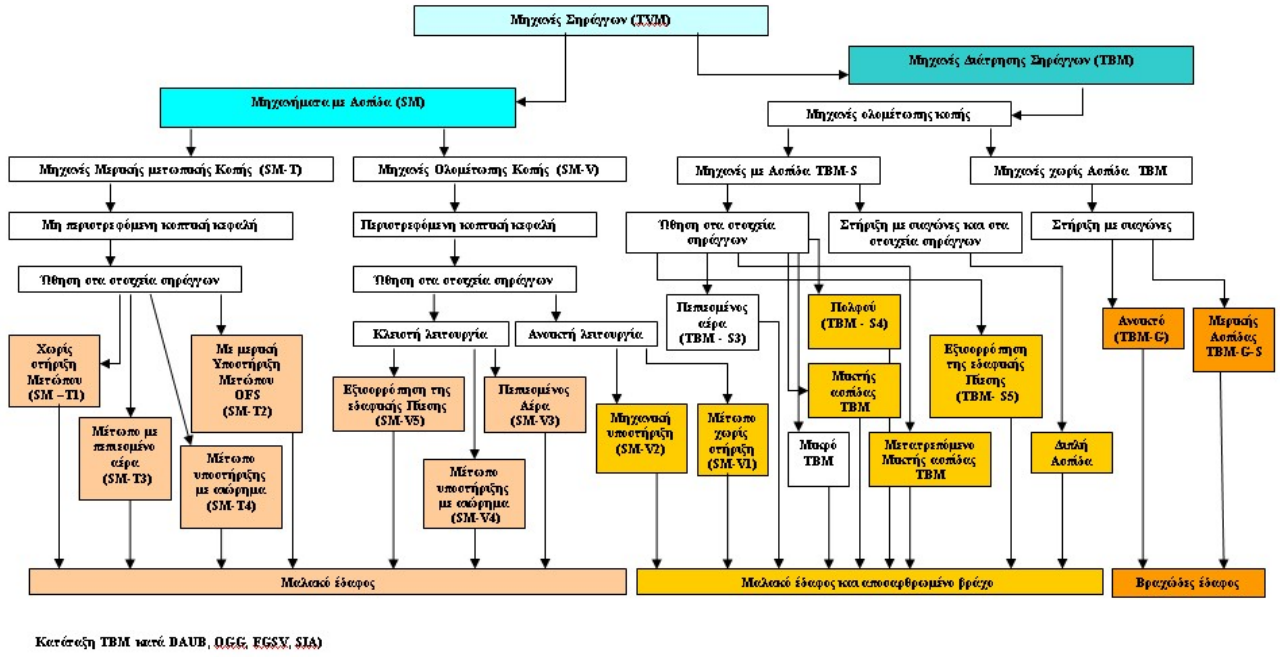
- Πολύ σκληρό, λειαντικό, ή διογκούμενο πέτρωμα.
- Γεωλογικοί σχηματισμοί που είναι γνωστοί ότι είναι απρόβλεπτοι, όπως καρστικός ασβεστόλιθος ή σχηματισμοί ηφαιστειακής λάβας.
- Μικρού μήκους σήραγγες.
- Μεταβλητή γεωμάζα που απαιτεί συχνές αλλαγές στις μεθόδους διάνοιξης.

7.1.2.3 Επιλογή μεταξύ διάνοιξης συμβατικής ή με TBM

Κανένας από τους δυσμενείς ή ευνοϊκούς παράγοντες δεν πρέπει να ληφθεί ως απόλυτος. Κάθε έργο είναι διαφορετικό, και ένα προσεκτικό ζύγισμα όλων των παραγόντων, με σωστή κρίση, οδηγεί στην τελική απόφαση. Η επιλογή του τύπου της μηχανής γίνεται βάσει αξιολόγησης των γεωλογικών, υδρογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών στη ζώνη διέλευσης της σήραγγας, των γεωμετρικών στοιχείων της διατομής της σήραγγας και της χάραξης, των περιορισμών και όρων που επιβάλλονται από περιβαλλοντικές ρυθμίσεις και άδειες, των συνθηκών ευστάθειας στο μέτωπο και στη διατομή της σήραγγας, των απαιτήσεων χρονισμού τοποθέτησης των μέτρων άμεσης στήριξης, και των χρονικών περιορισμών για την παράδοση της σήραγγας.

7.1.3 Διάκριση μηχανών

Ο όρος Μηχανή Διάτρησης Σηράγγων (TBM) χρησιμοποιείται πλέον παγκόσμια για όλες τις μηχανές που έχουν έναν ολομέτωπο τροχό κοπής του πετρώματος για τη διάνοιξη της σήραγγας. Εν τούτοις, οι γερμανικές, αυστριακές και ελβετικές ενώσεις που ασχολούνται με τη διάνοιξη σηράγγων εξέδωσαν το 1996 (Wittke, 2007; Maidl et al., 2008) μια ταξινόμηση (Σχήμα 7-3) όπου TBM θεωρούνται μόνον οι μηχανές που διανοίγουν βράχους.

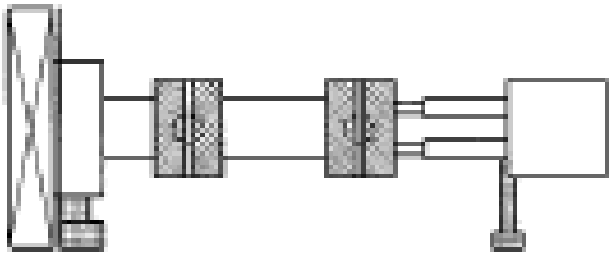


Σχήμα 7-3. Διάκριση μηχανών σύμφωνα την DAUB.

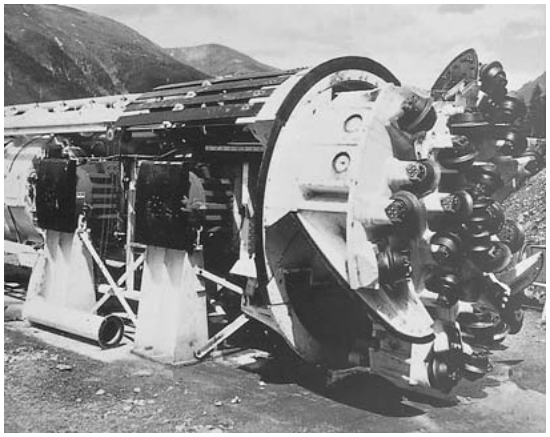
Στη διεθνή επιστημονική κοινότητα, δεν έχει ακόμη όμως επιτευχθεί ένα ενιαίο σύστημα ταξινόμησης των μηχανών αυτών. Η "Ιαπωνική Ένωση Σηραγγοποιίας τις διακρίνει με βάση το σύστημα ώθησης τους. Σύμφωνα με τη Γαλλική Ένωση Σηραγγοποιίας (AFTES), την οποία ακολουθεί και η ελληνική προδιαγραφή (ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-12-02-01-02:2009), προτείνεται η ταξινόμηση με βάση τη στήριξη που είναι σε θέση να παράσχει η μηχανή κατά τη διάρκεια της εκσκαφής, ήτοι (i) καθόλου στήριξη (μηχανή χωρίς ασπίδα), (ii) στήριξη μόνον περιφερειακή (ανοικτή ασπίδα), και (iii) στήριξη τόσον περιφερειακή όσον και μετωπική με κλειστό σύστημα πίεσης (κλειστή ασπίδα).

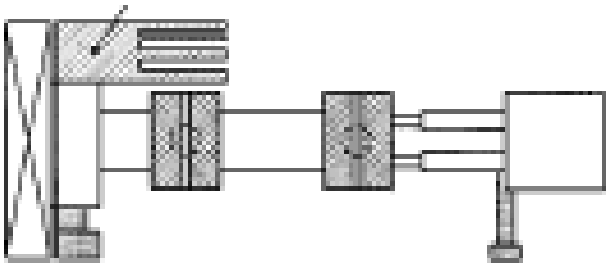
Οι μηχανές κύριας κεντρικής δοκού (main beam), που εξετάζονται στο παρόν κεφάλαιο, δεν διαθέτουν ασπίδα και προωθούνται με ωστήρες πάκτωσης· ως εκ τούτου ανήκουν στην (i) κατηγορία. Διακρίνονται σε

(Σχήμα 7-4α) περιφερειακά ανοικτά TBM-G για μικρής διαμέτρου σήραγγες, σε TBM με ασπίδα οροφής για προστασία από μεμονωμένες βραχοπτώσεις (Σχήμα 7-4β), σε TBM με ασπίδα οροφής και πλευρικά πέδιλα καθοδήγησης για προστασία και στήριξη (Σχήμα 7-4γ), και σε TBM με ασπίδα κοπτικής κεφαλής (TBM-GS) για προστασία του προσωπικού στην περιοχή της κοπτικής κεφαλής και στήριξη του πετρώματος στην περιοχή του μετώπου (Σχήμα 7-4δ).

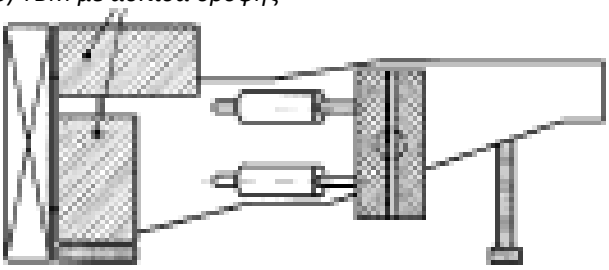


(α) Περιφερειακά ανοικτό (TBM-G)

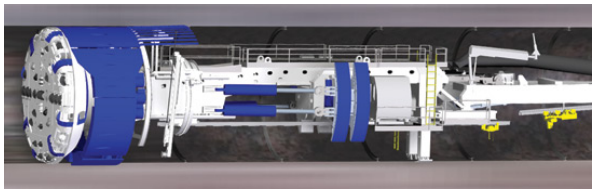




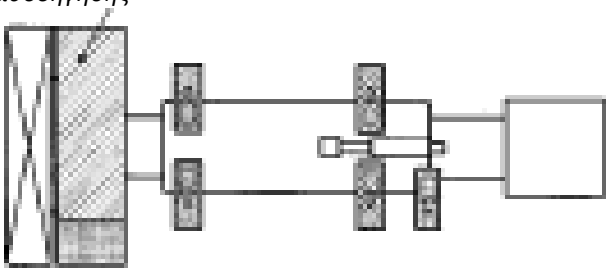
(β) TBM με ασπίδα οροφής

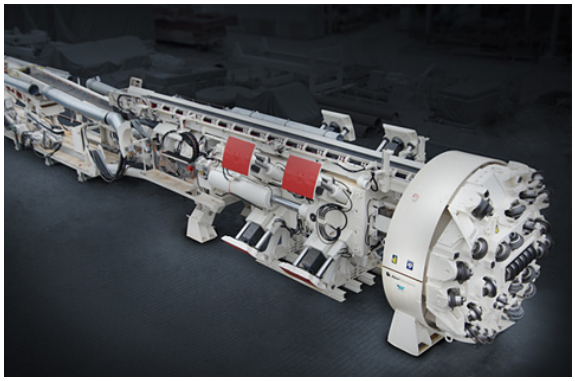


(γ) TBM με ασπίδα οροφής και πλευρικά πέδιλα καθοδήγησης



TBM Robbins





(δ) TBM με ασπίδα κοπτικής κεφαλής (TBM-GS)

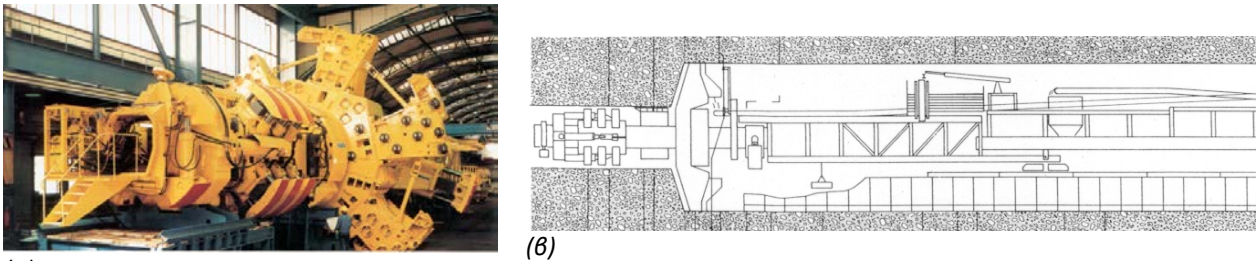
Σχήμα 7-4. Τύποι μηχανών TBM με ωστήρες πάκτωσης

Μία ξεχωριστή κατηγορία μηχανών που δεν διαθέτουν μια πλήρη κυκλική ασπίδα και που προωθούνται με ωστήρες πάκτωσης, είναι τα TBM διεύρυνσης (RBM). Οι μηχανές διεύρυνσης (Reamer TBMs) διευθυντικών στοών (Σχήμα 7-5α) επιτρέπουν τη διεύρυνση μιας αξονικής μικρότερης σήραγγας (Σχήμα 7-5β),

που συνήθως έχει διανοιχτεί προηγουμένως με τη χρήση ΤΒΜ. Η αρχή λειτουργίας και οι κύκλοι εργασιών του RBM είναι οι ίδιες με αυτές του ΤΒΜ χωρίς ασπίδα. Τα κύρια συστατικά της μηχανής είναι:

- Περιστρεφόμενη κοπτική κεφαλή διεύρυνσης στοών στην οποία είναι τοποθετημένα τα εργαλεία κοπής, και το πρώτο σύστημα αποκόμισης των μπαζών.
- Έμβολα ώσης.
- Δύο ζευγάρια ωστήρων πάκτωσης που βρίσκονται μέσα στη διευθυντική στοά εμπρός από την κοπτική κεφαλή διεύρυνσης.
- Κινητήρες, σύστημα οδήγησης, και άλλος ηλεκτρικός, μηχανικός, υδραυλικός εξοπλισμός.

Κύριο πεδίο εφαρμογής είναι οι βραχομάζες των οποίων τα χαρακτηριστικά ποικίλλουν από πολύ καλές έως μέτριες με μέτριο έως υψηλό χρόνο αυτοϋποστήριξης. Η χρήση των μηχανών αυτών είχε παλαιότερα μεγαλύτερη αξία, όταν τα μεγάλης διαμέτρου ΤΒΜ απαιτούσαν μια πολύ μεγάλη επένδυση σε σχέση με το μισθολογικό κόστος.



(α) (β)

Σχήμα 7-5. Διάνοιξη σήραγγας με διεύρυνση

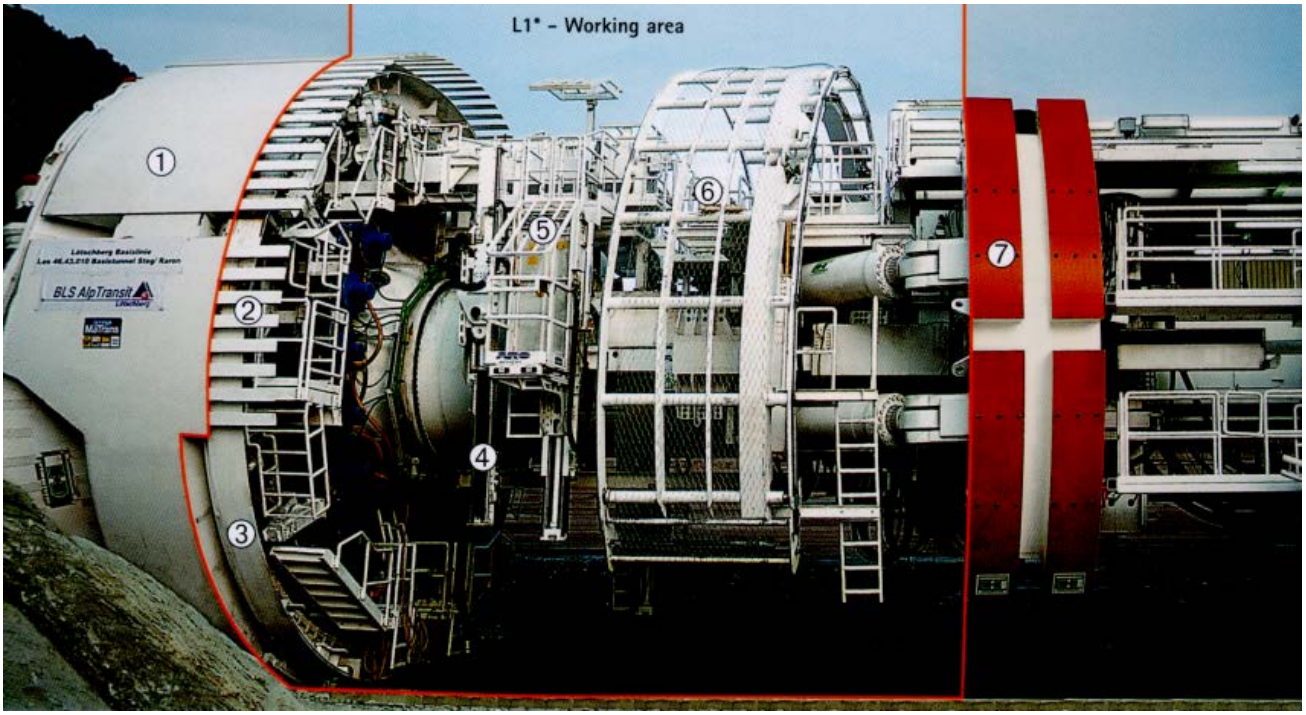
7.1.4 Τα μέρη της μηχανής

Ένα πλήρως εξοπλισμένο ΤΒΜ καταλαμβάνει πάνω από 100 m σήραγγας (Σχήμα 7-6). Όλα τα μέρη του πρέπει να προχωρούν με το μέτωπο εκσκαφής, και στοιχεία όπως σιδηροτροχιές, καλώδια ηλεκτρικού ρεύματος, και σωλήνες αερισμού πρέπει να επεκτείνονται πίσω από το ΤΒΜ καθώς αυτό προωθείται. Όλοι οι μηχανισμοί πρέπει να είναι σε θέση να λειτουργούν με ρυθμό σύμφωνο με την προχώρηση της κοπτικής κεφαλής. Η ανεπάρκεια στην επίδοση οποιουδήποτε μέρους παρεμποδίζει την προχώρηση και έχει επιπτώσεις στον προγραμματισμό και το κόστος. Το συγκρότημα διάνοιξης διακρίνεται στη μηχανή και στο συρμό εξυπηρέτησης.



Σχήμα 7-6. TBM GS και συρμός υποστήριξης της WIRTH

Τα συστήματα της μηχανής (Σχήμα 7-7) διακρίνονται σε 4 κύριες ομάδες, ήτοι: (α) διάτρησης του μετώπου, (β) πάκτωσης και ώσης της μηχανής, (γ) αποκόμισης των μπαζών εκσκαφής, και (δ) άμεσης στήριξης της σήραγγας. Επίσης, έχει εξοπλισμό γεώτρησης για διερευνητική δειγματοληψία, τσιμεντενέσεις, τοποθέτηση ελαφρών δοκών προπορείας και κατασκευή στραγγιστήριων οπών.



Σχήμα 7-7. Μέρη μηχανής TBM. (α) Μηχανή με ένα ζεύγος ωστήρων, (1) προστασία της κεφαλής, (2) λωρίδες προστασίας, (3) ανυψωτής πλαισίων, (4) διατρητικά αγκυρίων, (5) οροφές ασφαλείας, (6) ανυψωτής δομικού πλέγματος, (7) ωστήρες πάκτωσης

7.2 Εξόρυξη του πετρώματος

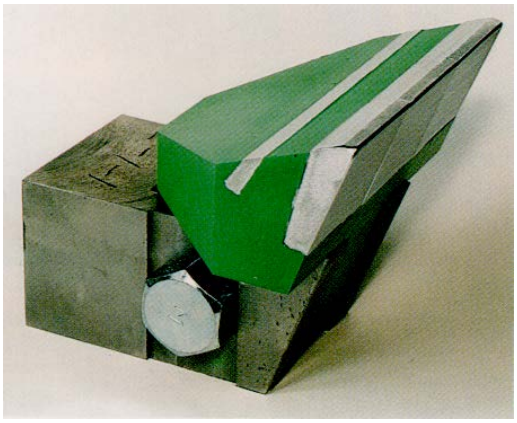
Η εξόρυξη του πετρώματος από τα σύγχρονα TBM επιτυγχάνεται με την κοπή του από μια κλειστή κοπτική κεφαλή, και τη στη συνέχεια αποκόμιση των μπαζών από το μέτωπο.

7.2.1 Κοπτική κεφαλή (Cutter Head)

Η κοπτική κεφαλή (Σχήμα 7-8γ) η οποία βρίσκεται στην κορυφή της μηχανής, ωθείται και περιστρέφεται επάνω στο πέτρωμα του μετώπου. Η μορφή της κεφαλής δύναται να είναι ελαφρώς θολωτή για διαμέτρους μέχρι 4÷5 m και επίπεδη για μεγαλύτερες διαμέτρους. Η κεφαλή λειτουργεί ως: (α) φορέας των κοπτικών, (β) συλλέκτης και αποκομιστής των υλικών της κοπής, (γ) στήριγμα του μετώπου κατά τις παύσεις λειτουργίας, (δ) στήριγμα του μετώπου σε περίπτωση κατάρρευσης. Πίσω από την κοπτική κεφαλή βρίσκονται η κύρια δοκός, που αναλαμβάνει την πλήρη ώση και στρέψη της κεφαλής και οι μηχανές κίνησης της κοπτικής κεφαλής. Στην κοπτική κεφαλή βρίσκονται τοποθετημένοι σε υποδοχές (housings) οι κοπτικοί δίσκοι. Η κοπτική κεφαλή ωθεί με δύναμη τους δίσκους ενάντια στο μέτωπο. Με την περιστροφή της κεφαλής, οι δίσκοι κάνουν μια κίνηση κοπής σε όλο το μέτωπο. Η πίεση στην αιχμή των κοπτικών δίσκων υπερβαίνει την αντοχή σε θλίψη του βράχου και σε τοπικό επίπεδο τον συντρίβει. Έτσι, η αιχμή του δίσκου ωθείται κυλιόμενη στο βράχο, μέχρι η δύναμη ώσης και η αντίσταση του βράχου να βρεθούν σε ισορροπία. Μέσω αυτής της μετατόπισης, που περιγράφεται ως καθαρή διείσδυση, ο κοπτικός δίσκος δημιουργεί τοπικά υψηλή τάση (εφελκυσμό διάσπασης και διάτμηση), η οποία οδηγεί σε απόσπαση μεγάλων επίπεδων θραυσμάτων βράχου. Επειδή η ώση των δίσκων έχει τοπική μόνο επίδραση στο πέτρωμα, η μέθοδος διάνοιξης μπορεί να θεωρηθεί ως ήπια για την περιβάλλουσα βραχομάζα. Ο Πίνακας 7-1 δίνει βασικά τεχνικά στοιχεία που επηρεάζουν τη διάτρηση από τη μηχανή.

Πίνακας 7-1. Τεχνικά στοιχεία της διάτρησης

Πέτρωμα	Δομή	Μηχανή TBM
Ορυκτολογική σύσταση	Κερματισμός	Διάμετρος κεφαλής
Σκληρότητα	Σχιστότητα	Ώση
Αποξεστικότητα	Διαστρωμάτωση	Ροπή στρέψης
Αντοχή θλιπτική	Προσανατολισμός	Μορφή δίσκων
Αντοχή διατμητική-εφελκυστική	Ανισοτροπία	Διάταξη δίσκων
Αντοχή σε εφελκυστική διάρρηξη	Ενστρώσεις	Μορφή κάδων
Υδροφορία	Κενά	Στροφές κοπτικής κεφαλής



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 7-8. Αριστερά: Πάνω: Κοπτικά δόντια, Κάτω: Κοπτικοί δίσκοι. Δεξιά: Διάταξη κοπτικών δίσκων μηχανής διάνοιξης της σιδηροδρομικής σήραγγας βάσης του Loetschberg, (1) 8 κεντρικοί δίσκοι, (2) 39 δίσκοι μετώπου, (3) 13 δίσκοι περιφέρειας.

Η κεφαλή του TBM πρέπει να είναι ικανή να περιστρέφεται τόσο σύμφωνα όσο και αντίθετα με την κίνηση των δεικτών του ωρολογίου, όταν τα έμβολα προώθησης είναι ενεργοποιημένα. Τα πρώτα TBM χρησιμοποιούσαν δόντια (teeth, rippers) (Σχήμα 7-8α) και αποξεστήρες (drag bits – drag picks - scrapers) για κοπτικά. Αυτά κατασκευάζονται από πολύ σκληρό κράμα χάλυβα στα οποία συχνά τοποθετείται ακμή από καρβίδιο βολφραμίου, και εκσκάπτουν μαλακούς βράχους και εδάφη με σχίσιμο. Γενικά, είναι κατάλληλα για πετρώματα με αντοχή μέχρι 90 MPa. Οι σύγχρονες μηχανές είναι εξοπλισμένες με δίσκους κοπής, διαμέτρου συνήθως 17”÷19” (432÷483mm), στερεωμένους σε κυλίνδρους, που επίσης κατασκευάζονται από σκληρό κράμα χάλυβα, και εκσκάπτουν το πέτρωμα με δράση κύλισης - συντριβής εφαρμόζοντας πίεση στο βράχο επαρκή για να τον θραύσει. Οι κοπτικοί δίσκοι (Σχήμα 7-8β) είναι κατάλληλοι για χρήση σε πετρώματα αντοχής μέχρι 275 MPa. Για ακόμα σκληρότερα πετρώματα, κύλινδροι δύνανται να έχουν πλέον του ενός κοπτικούς δίσκους στους οποίους είναι ενσωματωμένα καρβίδια βολφραμίου (TCI). Σε κοπτικές κεφαλές μεγαλύτερες των 4 m οι κοπτικοί δίσκοι μπορούν συνήθως να αλλάζονται από πίσω.

Η κοπτικότητα του άρρηκτου πετρώματος από τους δίσκους προσδιορίζεται από το λόγο της εφελκυστικής προς τη θλιπτική αντοχή, σ_{ti}/σ_{ci} του άρρηκτου πετρώματος, που στην εκμηχανισμένη διάνοιξη

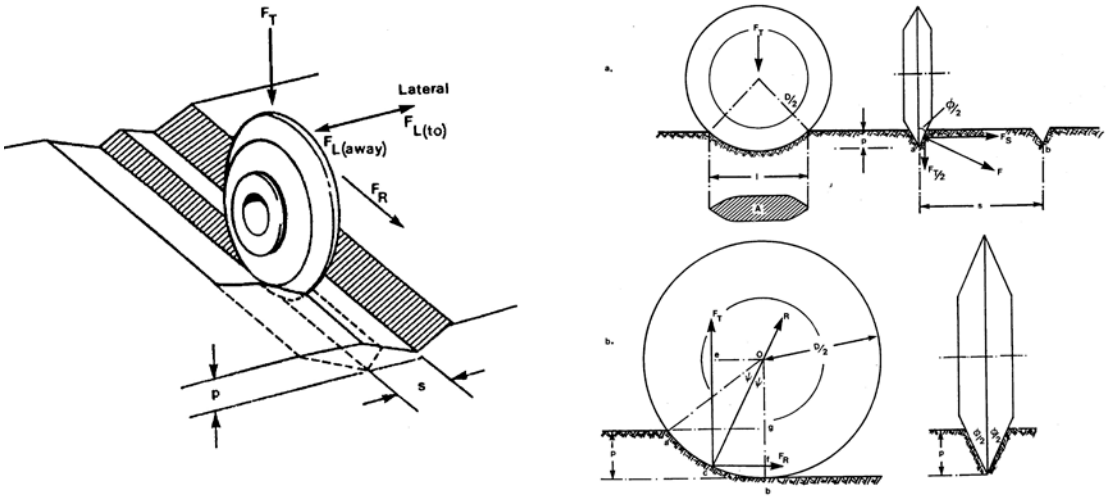
σηράγγων αναφέρεται ως δυσθραυστότητα (toughness). Σε πετρώματα με χαμηλή θλιπτική αντοχή και υψηλή δυσθραυστότητα οι επαγόμενες από τους δίσκους εφελκυστικές σχιστικές τάσεις είναι μικρές. Σε αυτά, επιπλέον των δίσκων, απαιτούνται αποξεστήρες (drag picks) ως εκσκαπτικά εργαλεία. Όλα τα κοπτικά πρέπει να μπορούν να τοποθετούνται από το πίσω μέρος της κοπτικής κεφαλής με απόλυτη ασφάλεια. Το θραυσμένο πέτρωμα συλλέγεται από κάδους εκχωμάτωσης (buckets) και μεταφέρεται σε χοάνες και στη συνέχεια σε μεταφορικό ιμάντα.

Το μέγεθος της ώσης στο μέτωπο και η ροπή στην κοπτική κεφαλή ποικίλουν ώστε να ταιριάζουν στις συνθήκες που αναμένεται να συναντηθούν. Η ώση μιας σύγχρονης μηχανής μπορεί να υπερβεί τα 10MN. Για κοπτικούς δίσκους 17" ÷19" οι δυνάμεις ώσης σε κάθε κοπτικό κυμαίνονται μεταξύ 200 και 300kN. Η ροπή στρέψης της κοπτικής κεφαλής δύναται να υπερβαίνει τα 20MNm.

Οι ρυθμοί προχώρησης που επιτυγχάνονται συνήθως υπερβαίνουν κατά πολύ εκείνους της μεθόδου «διάτρηση-ανατίναξη». Ο ρυθμός διείσδυσης δ_p [mm/rev] εξαρτάται από την αντοχή του πετρώματος και τη διάμετρο του δίσκου. Ο Girmscheid (2005), σε σχετικά διαγράμματα για δίσκους 17"÷19", δίνει το ρυθμό διείσδυσης ως συνάρτηση της ώσης F_c του κοπτικού και της αντοχής σ_{ci} του πετρώματος (80÷300MPa). Σε αυτά, για ώσεις 200÷300 kN που είναι το βέλτιστο εύρος εφαρμογής, η διείσδυση αυξάνεται σημαντικά με την αύξηση της ώσης και τη μείωση της θλιπτικής αντοχής. Ο Graham(1976) παράγαγε σχέση (7-1 αριστερά) η οποία συμφωνεί σε γενικές γραμμές με τα διαγράμματα του Girmscheid. Οι Farmer & Glossop (1980) παραγάγανε αντίστοιχα μία σχέση (7-1 δεξιά) στην οποία συναρτούν το ρυθμό προχώρησης με την εφελκυστική αντοχή σχισμού σ_{ts} της στρώσης.

$$\delta_p[mm/rev] = 3940 \cdot \frac{F_c\ [kN]}{\sigma_{ci}\ [kPa]}\ (Graham);\ \ \delta_p\left[\frac{mm}{rev}\right] = 624 \cdot \frac{F_c\ [kN]}{\sigma_{ts}\ [kPa]}\ (Farmer\ \&\ Glossop) \tag{7-1}$$

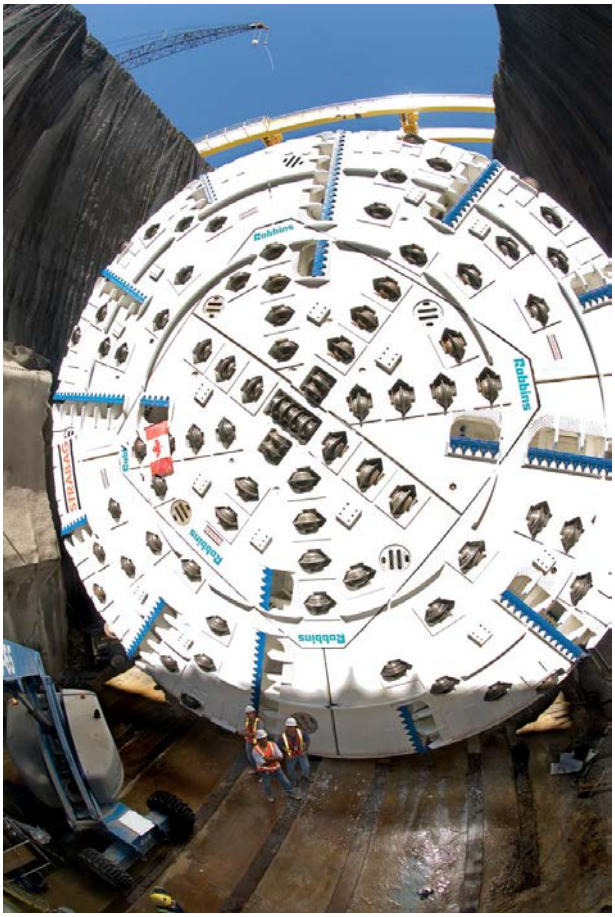
Οι κοπτικοί δίσκοι κινούνται στην κοπτική κεφαλή, με ταχύτητα ανάλογη με την ακτινική απόστασή τους από το κέντρο της κεφαλής. Η ταχύτητα περιστροφής της κοπτικής κεφαλής εξαρτάται άμεσα από την επιτρεπτή ταχύτητα περιστροφής του κοπτικού. Γι' αυτό, η ταχύτητα της κοπτικής κεφαλής είναι αργή, χαρακτηριστικά περίπου 4÷5 περιστροφές / λεπτό για διαμέτρους σηράγγων 10m, που αντιστοιχούν σε ταχύτητα στην περιφέρεια της κοπτικής κεφαλής ~140-160 m/min. Με τη μείωση της διαμέτρου η ταχύτητα περιστροφής αυξάνεται.



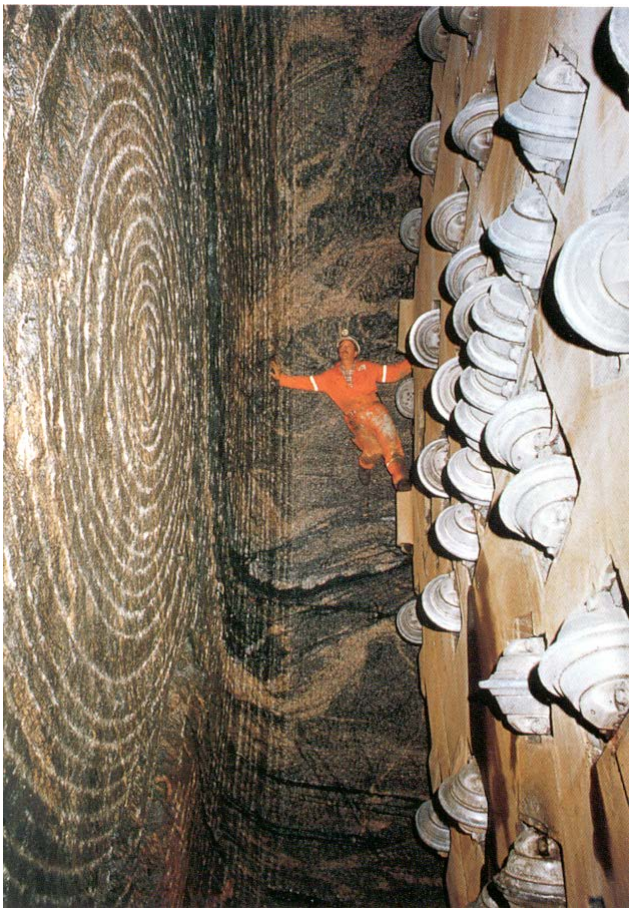
Σχήμα 7-9. Κοπή από δίσκο. Αριστερά: Δυνάμεις στο δίσκο. Δεξιά: Βάθος διείσδυσης

Το τμήμα του δίσκου μέσα στο πέτρωμα είναι ευθύγραμμο, αλλά κινείται και κόβει σε μια κυκλική τροχιά. Αυτό υποβάλλει τον κοπτικό δίσκο σε μια στρεπτική καταπόνηση (Whittaker & Frith, 1990) που απαιτεί αντοχή και σε λοξά φορτία (Σχήμα 7-9). Η φόρτιση είναι ιδιαίτερα μεγάλη στους κόπτες πλησιέστερα στο κέντρο της κεφαλής (Σχήμα 7-8γ (1)), όπου, λόγω της μεγάλης καμπυλότητας της τροχιάς, υφίστανται σημαντική συνιστώσα στροφής ως προς διαμετρικό άξονα πέραν της αξονικής περιστροφής. Τούτο ενισχύεται στους δίσκους μεγάλης διαμέτρου. Γι' αυτό, σε μερικές μηχανές χρησιμοποιούνται μικρότερης διαμέτρου

κεντρικοί δίσκοι οι οποίοι συνενώνονται. Οι περιφερειακοί κοπτικοί δίσκοι (Σχήμα 7-8γ (3)) ελέγχουν τη διάμετρο εκσκαφής και δίνουν στη σήραγγα το ομαλό τελείωμά της.



(α) Διάταξη κοπτικών μηχανής Robbins



(β) Χάραξη ομόκεντρων αυλάκων – Μηχανή Robbins.

Σχήμα 7-10. Διάταξη κοπτικών σε διαδοχικές ακτίνες

Οι κοπτικοί δίσκοι ή τα δόντια διατάσσονται ακτινικά (Σχήμα 7-10α) στην κοπτική κεφαλή ώστε κατά την περιστροφή της να χαράσσουν το μέτωπο σε ομόκεντρες αύλακες (Σχήμα 7-10β),. Το διάστημα των αυλάκων και οι δίσκοι επιλέγονται με βάση τον τύπο του πετρώματος και την ευκολία κοπής του. Εξ αυτού του διαστήματος προκύπτει το μέγεθος των θραυσμάτων του βράχου. Οι αύλακες καθορίζονται γενικά σε μεταξύ τους αποστάσεις της τάξης του δεκάτου του μέτρου, και η διάταξη τους στοχεύει στην ομοιόμορφη κατανομή της ώσης στην κεφαλή. Η διάταξη των κοπτών στην κεφαλή είναι σημαντικό χαρακτηριστικό του σχεδιασμού της μηχανής, δεδομένου ότι η ισορροπημένη φόρτιση στους κόπτες αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τη διάρκειά τους. Για δίσκους 17”÷19” συνήθη διαστήματα s_d μεταξύ των αυλάκων είναι 65÷95mm, με τη σύγχρονη τάση να είναι τα διαστήματα 85÷95 mm. Όσο μεγαλύτερα είναι τα διαστήματα, τόσο αδρότερο είναι το εκσκαπτόμενο υλικό και ως εκ τούτου πιο κατάλληλο για χρήση. Ο αριθμός n_d των δίσκων που είναι τοποθετημένοι στην κοπτική κεφαλή εξαρτάται από το επιλεγμένο διάστημα των αυλάκων κοπής και τη διάμετρο D_H του μετώπου της σήραγγας, και βρίσκεται στο διάστημα της αριστερής επόμενης σχέσης:

$$2 + 7 \cdot D_H \le n_d \le 4 + 7.6 \cdot D_H \text{ ή } n_d = \frac{D_H}{2 \cdot s_d} \tag{7-2}$$

Στην περίπτωση που όλα τα διαστήματα είναι ίσα και σε κάθε αύλακα αντιστοιχεί μόνο ένας δίσκος, ισχύει η ανωτέρω δεξιά σχέση. Στην τελευταία περίπτωση, αν για παράδειγμα το διάστημα των αυλάκων κοπής s_d = 67 mm και η διάμετρος D_H = 10 m, τότε ο αριθμός των δίσκων n_d είναι 75.

Οι κοπτικοί δίσκοι ταξιδεύουν πολύ διαφορετικές αποστάσεις με την περιστροφή της κοπτικής κεφαλής. Αυτό σημαίνει ότι οι δίσκοι σε εξωτερικές θέσεις ταξιδεύουν πολύ περισσότερο και πρέπει να

αντικαταθίστανται νωρίτερα. Η φθορά οδηγεί σε πιο δύσκολη διάτρηση και η αύξηση της αποξεστικότητας οδηγεί σε σημαντικό κόστος για αλλαγές στα κοπτικά. Επομένως, εκτός από τη διείσδυση που καθορίζει την απόσταση κοπής, θα πρέπει να εκτιμάται η αποξεστικότητα, προκειμένου να υπολογίζεται το κόστος και ο χρόνος αλλαγής των κοπτικών. Κατάλληλη δοκιμή εκτίμησης της αποξεστικότητας είναι ο προσδιορισμός του CAI (Cerchar Abrasiveness Index). Η φθορά, των κοπτικών δίσκων, των κυλίνδρων, των άκρων των κάδων και του χείλους της κοπτικής κεφαλής, αυξάνεται σημαντικά με μόλις μία σχετικά μικρή διείσδυση νερού. Προφανώς, το ίδιο το τρεχούμενο νερό αυξάνει ελαφρώς μόνο τη φθορά. Μια μικρή εισροή νερού, ωστόσο, λόγω της επιφανειακής τάσης δημιουργεί με τα μπάζα μία αποξεστική πάστα, η οποία αναπτύσσει μια πολύ μεγάλη δευτερεύουσα λειαντική δράση.

7.2.2 Μεταφορά μπαζών

Οι δίσκοι κοπής εκσκάπτουν το πέτρωμα, και τα μπάζα πέφτουν κυρίως στο ανάστροφο της σήραγγας. Ο όγκος των μπαζών είναι 170÷200% του αδιατάραχτου όγκου. Αυτά συλλέγονται (Σχήμα 7-8γ (4)) από κάδους (buckets) οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στην περίμετρο της κοπτικής κεφαλής, και περιστρέφονται με την κοπτική κεφαλή. Στις +60^o από τη στέψη για αριστερόστροφη περιστροφή ή στις -60^o για δεξιόστροφη περιστροφή, τα μπάζα μέσα από χοάνες ολισθαίνουν προς τα κάτω στον ιμάντα μεταφοράς. Ο ιμάντας μεταφοράς στη συνέχεια φορτώνει τα μπάζα στο σύστημα αποκόμισης της σήραγγας, που είναι είτε βαγονέτα ή αυτοκίνητα φορτηγά ή ταινιόδρομος, με τα οποία οδηγούνται έξω από τη σήραγγα, και στη συνέχεια μεταφέρονται σε χώρο απόθεσης.

Το πλάτος του ιμάντα μεταφοράς, στη μηχανή, προκύπτει από τη μέγιστη διείσδυση των κοπτικών, τον αριθμό των κάδων και την ταχύτητα του ιμάντα, που γενικά δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 1.3 m/s, καθόσον υψηλότερες ταχύτητες μειώνουν τη διάρκεια ζωής του. Στα ΤΒΜ μεγάλης διαμέτρου ο ιμάντας μεταφοράς δύναται να τοποθετείται κεντρικά. Στα ΤΒΜ μικρότερης διαμέτρου, λόγω της στενότητας του χώρου, μια κεντρική τοποθέτηση του ιμάντα μεταφοράς δεν είναι εφικτή και ως εκ τούτου τοποθετείται πάνω από το κύριο εφέδρανο.

Κατά την αποκόμιση των μπαζών, η συνεχής εκσκαφή από την κοπτική κεφαλή δίνει τη θέση της σε μια διακεκομμένη ροή υλικού προς τον ιμάντα μεταφοράς. Σε μηχανές μικρότερης διαμέτρου, αυτή η διακεκομμένη ροή υλικού δεν προκαλεί πρόβλημα. Σε μηχανές όμως μεγάλης διαμέτρου, αν η κοπτική κεφαλή δεν διαμορφωθεί έτσι ώστε να ταιριάζει στην ικανότητα του ιμάντα μεταφοράς, αυτή η ροή υλικού μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένη απόδοση λόγω μείωσης της πραγματοποιούμενης διείσδυσης. Με την αύξηση του αριθμού των κάδων τα προβλήματα αυτά, όπως και της επακόλουθης απώλειας ροπής στρέψης, μειώνονται. Προβλήματα μπορεί να προκύψουν επίσης, τόσο στους κάδους της κοπτικής κεφαλής όπως και στον ιμάντα μεταφοράς, λόγω εμφράξεων που προκαλούνται από τους ογκόλιθους ή την επικόλληση και συσσώρευση λεπτόκοκκων συνεκτικών μπαζών. Η υπερβολική εισροή νερού στο μέτωπο μπορεί να μετατρέψει τα μπάζα σε λάσπη ώστε να καθίστανται αναγκαίες αντλίες λάσπης ή ατέρμονες κοχλίες, και το ΤΒΜ να μη λειτουργεί κανονικά. Σε αυτή την περίπτωση, όταν εμφανίζονται σύντομες ζώνες ρηγμάτων, είναι δυνατόν να απαιτείται βελτίωση του εδάφους, πχ. με τσιμεντενέσεις ή ακόμη και κατάψυξη. Για μακρύτερα τμήματα η συνεχής προσαρμογή δεν είναι πρακτικά δυνατή και η όλη σύλληψη της διάνοιξης θα πρέπει να επανεξετάζεται.

7.3 Προχώρηση της μηχανής

7.3.1 Κύριο σύστημα περιστροφής (Main Drive)

Τα ΤΒΜ οδηγούνται από ηλεκτρικούς ή υδραυλικούς κινητήρες, ανάλογα με τον τύπο της μηχανής. Οι διάφοροι τύποι είναι:

• Ηλεκτρική κίνηση με τελείως κλειστό υδρόψυκτο κινητήρα, συχνά διπλής ταχύτητας με δύο ταχύτητες περιστροφής, που χρησιμοποιείται σε σκληρά πετρώματα.

• Ηλεκτρική κίνηση με έλεγχο συχνότητας και ένα συνεχώς ρυθμιζόμενο έλεγχο περιστροφών σε ένα ευρύ φάσμα.

• Ηλεκτρο-υδραυλική κίνηση. Ηλεκτροκίνητες υδραυλικές αντλίες παρέχουν στους υδραυλικούς κινητήρες του κύριου μηχανισμού κίνησης την απαιτούμενη ποσότητα ελαίου και την κατάλληλη πίεση άντλησης. Ο έλεγχος

της ταχύτητας περιστροφής είναι συνεχώς ρυθμιζόμενος σε όλο το φάσμα λειτουργίας των κινητήρων, που χρησιμοποιείται σε χαλαρά πετρώματα.

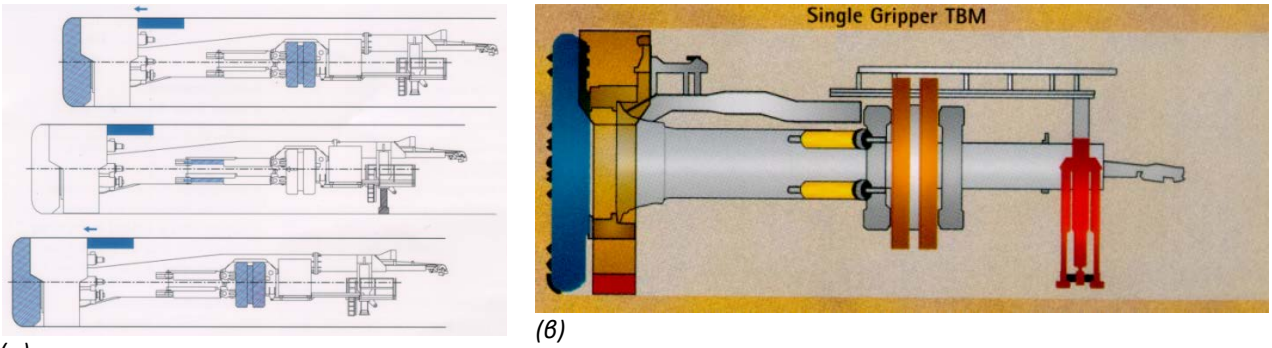
Για ΤΒΜ διαμέτρου 12 m θα μπορούσαν να υπάρχουν 10 - 14 κινητήρες μετάδοσης κίνησης στο γρανάζι του κυρίως εφεδράνου περιστροφής της κοπτικής κεφαλής. Οι υδραυλικοί κινητήρες πλεονεκτούσαν παλαιότερα σε σχέση με τους ηλεκτρικούς κινητήρες, λόγω αυξομείωσης του εύρους περιστροφών, ειδικά σε μηχανές που χρησιμοποιούνται σε χαλαρά πετρώματα όπως EPB και Slurry. Ωστόσο, η πολύ προηγμένη σύγχρονη τεχνολογία των ηλεκτρικών κινητήρων μεταβλητής συχνότητας τους καθιστά πλέον πιο κατάλληλους.

7.3.2 Κύριο εφέδρανο (Main Bearing)

Το κύριο εφέδρανο της κεφαλής δεν αναλαμβάνει μόνον τις αντιδράσεις στα φορτία των κοπτικών, αλλά και δυνάμεις από εκκεντρότητες, διαρρήξεις και καταρρεύσεις στο μέτωπο. Ωστόσο, σπάνια έχουν καταστραφεί τα κύρια εφέδρανα από τη φόρτιση μόνο. Η ζωή τους καθορίζεται κυρίως από τον τύπο του συστήματος σφράγισης. Είναι επομένως σημαντικό να εξασφαλίζεται ότι οι σφραγίσεις ποτέ δεν ξεραίνονται, γιατί τότε χάνουν την ικανότητα λειτουργίας τους και η αστοχία του κυρίου εφεδράνου θα είναι αναμενόμενη. Τα χείλη της σφράγισης θα πρέπει επομένως να κινούνται πάντα σε μια λεπτή μεμβράνη γράσου (Maidl et al., 2008), και τα σημεία λίπανσης του συστήματος σφράγισης δεν πρέπει να ξεπερνούν τα 70÷80 cm μεταξύ τους.

7.3.3 Ωστήρες πάκτωσης (Grippers)

Διαταγμένα γύρω από το σώμα του ΤΒΜ, πίσω από την κοπτική κεφαλή βρίσκονται τα ζεύγη ωστήρων πάκτωσης, των οποίων τα πέδιλα είναι καμπύλα ώστε να ταιριάζουν στην καμπυλότητα της σήραγγας. Αυτά απαιτούν ελεύθερο τοίχωμα σήραγγας, το οποίο είναι διαθέσιμο μόνο σε σταθερό βράχο. Οι ωστήρες λειτουργούν υδραυλικά και ωθούνται επιλεκτικά στο πέτρωμα ώστε να διατηρούν το ΤΒΜ στη σχεδιασμένη χάραξη (Σχήμα 7-7α). Αυτά τα ζεύγη ωστήρων, που μπορεί να είναι περισσότερα από ένα και να υπάρχουν σε μία ή δύο διατομές (Σχήμα 7-7β), χρησιμεύουν επίσης στην αποτροπή της περιστροφής του σώματος σε αντίδραση στην περιστροφή της κεφαλής. Η κοπτική κεφαλή με τη μονάδα κίνησης ωθείται προς τα εμπρός από υδραυλικά έμβολα προχώρησης. Η διαδρομή του εμβόλου περιορίζει το μέγιστο μήκος προχώρησης, που δεν ξεπερνά τα 2.0 m. Τα όρια για τις εφαρμοζόμενες δυνάμεις πάκτωσης δεν προσδιορίζονται από τη δυνατότητα των εμβόλων, αλλά προκύπτουν από την φυσική κατάσταση του βράχου.



(α) (β)

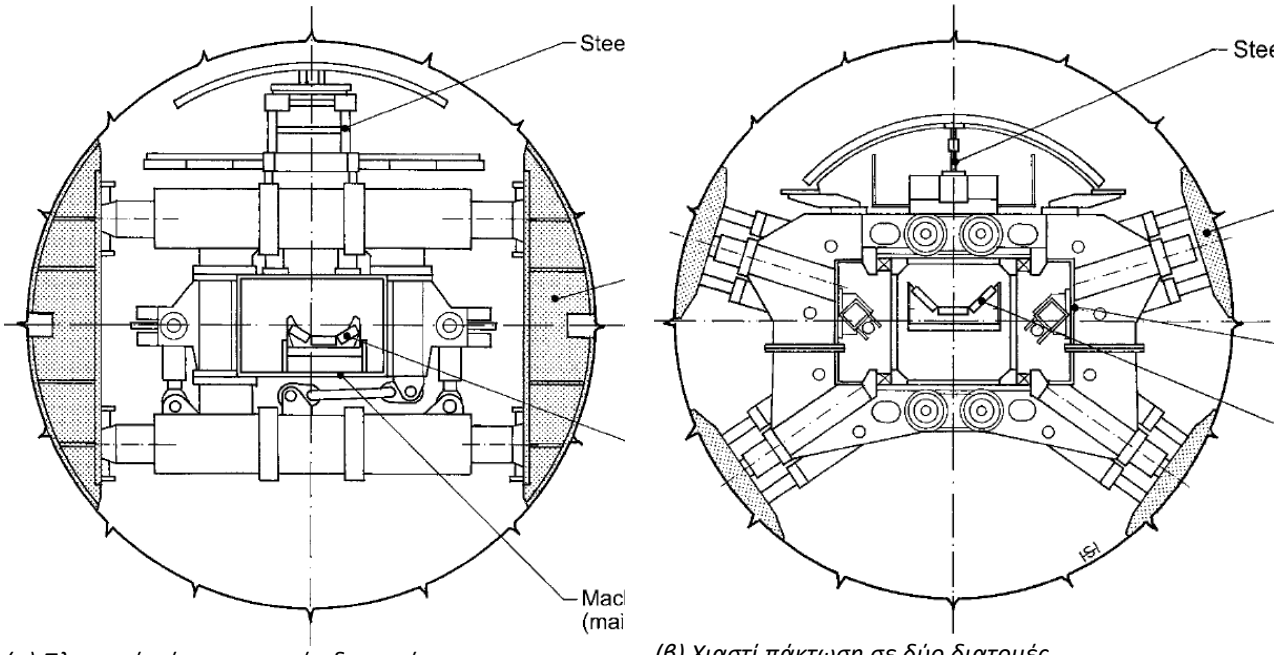
Σχήμα 7-11. (α) Κύκλος διάνοιξης, διάτρηση – προχώρηση των ωστήρων - διάτρηση. (β) Στήριξη του ΤΒΜ στο πίσω πόδι κατά την προώθηση των ωστήρων

Η λειτουργία του ΤΒΜ είναι μια κυκλικά επαναλαμβανόμενη διαδικασία (Σχήμα 7-11α). Η εκσκαφή είναι συνεχής έως ότου επιτευχθεί το όριο προώθησης της κοπτικής κεφαλής. Σε εκείνο το σημείο σταματάει η εκσκαφή, το οπίσθιο τμήμα της μηχανής υποστηρίζεται είτε από ένα δεύτερο ζεύγος ωστήρων πάκτωσης είτε από πόδια που εκτείνονται (Σχήμα 7-11β), και οι κύριοι ωστήρες πάκτωσης προωθούνται μαζί με το σώμα καθώς το τελευταίο ωθείται προς την κεφαλή.

Η διείσδυση στο πέτρωμα απαιτεί ώση στα κοπτικά. Η συνολική ώση της μηχανής είναι το άθροισμα των ώσεων στα κοπτικά και αντιστάσεων τριβής στο σώμα της μηχανής και στο συρμό εξυπηρέτησης. Η δύναμη ώσης στην κεφαλή δεν θα πρέπει να είναι πολύ μεγαλύτερη από όση απαιτείται, καθόσον υπερβολική

δύναμη ώθησης μπορεί να υπερφορτίσει το κύριο εφέδρανο ενός μέσου TBM. Μακροχρόνια υπερφόρτιση μπορεί να οδηγήσει σε φθορά των τροχιών του εφεδράνου, το οποίο σε μια ακραία περίπτωση, θα μπορούσε να απαιτήσει αλλαγή του εφεδράνου εντός της σήραγγας (Maidl et al., 2008). Η συνολική δύναμη ώθησης, η οποία ασκείται αξονικά, μεταφέρεται μέσω του μηχανισμού πάκτωσης στο περιβάλλον πέτρωμα. Από τους κατασκευαστές TBM, έχουν αναπτυχθεί δύο διαφορετικοί τύποι συστημάτων πάκτωσης και ώσης.

Η Robbins (Σχήμα 7-4γ) και η Herrenknecht προτιμούν ένα μονό σύστημα πάκτωσης (Σχήμα 7-12α) και ολίσθηση του σώματος της μηχανής σε συρόμενο πέδιλο. Ο στάτορας του TBM με ολόκληρη τη μονάδα κίνησης βρίσκεται εντός μονάδας προστασίας, αποτελούμενης από ένα ή περισσότερα μέρη, που μοιάζει με ασπίδα. Η μηχανή ολισθαίνει στο ανάστροφο επί πέδιλου, και πλευρικοί ωστήρες καθοδήγησης προστατεύουν τις πλευρές. Από πάνω υπάρχει ασπίδα οροφής, που συχνά επεκτείνεται σε δάχτυλα προστασίας από καταπτώσεις. Πιο πίσω υπάρχει η μονάδα πάκτωσης. Η πάκτωση επιτυγχάνεται με ισχυρά υδραυλικά έμβολα ενάντια στα τοιχώματα της σήραγγας. Εντός της μονάδας πάκτωσης, η κύρια δοκός μπορεί να προσανατολιστεί σύμφωνα με τη χάραξη εκσκαφής. Τα έμβολά πάκτωσης χρησιμεύουν επιπλέον στην καθοδήγηση της μηχανής.



(α) Πλευρική πάκτωση σε μία διατομή

(β) Χιαστί πάκτωση σε δύο διατομές

Σχήμα 7-12. Συστήματα ωστήρων πάκτωσης.

Η Jarva και η Wirth (Σχήμα 7-4δ) προτιμούν έναν Χιαστί -τύπο πάκτωσης (Σχήμα 7-12β). Οι πρόσθιοι και οι οπίσθιοι ωστήρες πάκτωσης σχηματίζουν μια μονάδα με το κύριο σώμα (Εξωτερικό κέλυφος - Kelly), στο οποίο η κύρια δοκός του TBM, μία ορθογωνική κοίλη διατομή (Εσωτερικό κέλυφος - Kelly) στηρίζεται μέσω ολισθαινόντων εδράνων (Maidl et al., 2008). Η κοπτική κεφαλή εδράζεται σε αυτήν την ορθογώνια κοίλη διατομή. Εντός της ορθογώνιας κοίλης διατομής, ο κύριος άξονας κίνησης συνδέει τη μονάδα κίνησης στο πίσω μέρος με την υποδοχή στήριξης στην κοπτική κεφαλή. Το TBM προσανατολίζεται με τη βοήθεια της μονάδας πάκτωσης πριν από κάθε διαδρομή. Σε αντίθεση με το σύστημα μονής πάκτωσης, το TBM συγκρατείται στη θέση του κατά τη διάρκεια κάθε διαδρομής. Η καθοδήγηση της μηχανής απαιτεί μετατόπιση και νέα τοποθέτηση της μονάδας πάκτωσης.

Και τα δύο συστήματα έχουν τους υποστηρικτές τους. Το σύστημα μονής πάκτωσης με πλευρικούς ωστήρες φαίνεται πιο στιβαρό, και πλεονεκτεί σε γεωλογικούς σχηματισμούς στους οποίους απαιτείται σημαντική υποστήριξη, καθόσον έχει περισσότερο χώρο διαθέσιμο πέριξ της μηχανής. Γενικά, οι δυνάμεις πάκτωσης των TBM κύριας δοκού ανέρχονται σε περίπου δύο φορές τη δύναμη ώθησης, και η εφαρμογή τους χωρίς αστοχία του πετρώματος και χωρίς ολίσθηση δεν είναι πάντοτε εφικτή. Σε κάθε περίπτωση η πάκτωση των ωστήρων οδηγεί σε εξαιρετικά μεγάλη φόρτιση του περιβάλλοντος πετρώματος, ιδιαίτερα επειδή η εναλλασσόμενη φόρτιση - αποφόρτιση επαναλαμβάνεται συνεχώς κατά τη διάνοιξη.

7.3.4 Σύστημα ελέγχου διεύθυνσης και πλοήγησης

Για την κοπή, το ΤΒΜ ωθεί τους κόπτες ώστε να διεισδύσουν στο πέτρωμα. Ο χειριστής ελέγχει την ώση στην κοπτική κεφαλή και την ταχύτητα περιστροφής. Πάρα πολλή ώθηση και αργή περιστροφή τείνει να καθυστερεί τη μηχανή ή να κάψει τους συμπλέκτες. Επίσης, με μικρή ώση και πολύ γρήγορη περιστροφή δεν θα προωθείται η μηχανή και θα αναδεύεται το πέτρωμα. Τότε, η κοπτική κεφαλή περιστρέφεται σε στάση και πέτρωμα πέφτει από την οροφή, με δημιουργία εκεί «καπνοδόχου», η οποία είναι ιδιαίτερα επικίνδυνη στις υποθαλάσσιες σήραγγες. Ο χειριστής δεν έχει καμία άμεση θέα ή αίσθηση του πετρώματος, και πρέπει επομένως να συναγάγει τις συνθήκες από μια σειρά οργάνων και οθονών στην καμπίνα του. Το έδαφος είναι σπάνια ομοιόμορφο για πολύ, και οι αλλαγές μπορεί να είναι ξαφνικές. Εφόσον επιτραπεί η προχώρηση του ΤΒΜ δίχως καθοδήγηση, τούτο δεν θα προωθηθεί σε ευθεία γραμμή. Οι αλλαγές στις γεωλογικές συνθήκες θα το εκτρέψουν και η βαρύτητα θα τείνει να το κινήσει προς τα κάτω. Επιπλέον, η αντίδραση από την περιστροφή της κοπτικής κεφαλής και οι ίδιες οι δυνάμεις κοπής θα έτειναν να μετατοπίσουν τη μηχανή από την ευθύγραμμη πορεία. Πολλά εξαρτώνται επομένως από την ικανότητα του χειριστή στην προώθηση και στην οδήγηση του ΤΒΜ. Η οδήγηση επομένως ενός ΤΒΜ απαιτεί έμπειρο χειριστή και επιτυγχάνεται από την εκλεκτική χρήση των ωστήρων πάκτωσης, με μερικές μηχανές να έχουν πρόσθετους ωστήρες αντιστήριξης-οδήγησης (Σχήμα 7-7β) στο μπροστινό άκρο.

Ο έλεγχος της καθοδήγησης σε μια σύγχρονη μηχανή επιτυγχάνεται από λέιζερ και στόχους. Οι μπροστινοί και οπίσθιοι στόχοι μπορούν να ρυθμιστούν από τον τοπογράφο, έτσι ώστε, όταν περνά η ακτίνα λέιζερ μέσα από το κέντρο και των δύο στόχων, το ΤΒΜ να είναι στην καθορισθείσα χάραξη. Η ακριβής οδήγηση είναι πολύ σημαντική καθώς η εκσκαφή ενός ΤΒΜ είναι λίγα μόνο εκατοστά μεγαλύτερη από την σχεδιασμένη. Επομένως, η τελειωμένη σήραγγα θα ακολουθήσει τη χάραξη και τις αποκλίσεις της εκσκαφής. Τέτοιες αποκλίσεις μπορούν να είναι ανεκτές, για παράδειγμα, σε μια υδαταγωγό σήραγγα, αλλά σε μια σήραγγα μετρό και ακόμα περισσότερο σε μια σιδηροδρομική σήραγγα υψηλών ταχυτήτων απαιτείται μεγάλη ακρίβεια στη χάραξη και στην κλίση. Στις σιδηροδρομικές σήραγγες, οι τροχιές τοποθετούνται επί της χάραξης με μεγάλη ακρίβεια. Κατά συνέπεια για κάθε εκατοστό της διατομής εκτός χάραξης, που επιτρέπεται στην προδιαγραφή ως ανοχή κατασκευής, η σήραγγα πρέπει να κατασκευάζεται δύο εκατοστά μεγαλύτερη σε διάμετρο ώστε να διατηρεί το περιτύπωμα των διερχομένων οχημάτων εντός διατομής. Η εμπειρία διδάσκει ότι η πιο συνετή και οικονομική λύση περιέχει επαρκή ανοχή της διατομής. Η ακρίβεια στην κλίση είναι τόσο σημαντική όσο και στην οριζόντια χάραξη. Για τις σήραγγες τρένων υψηλών ταχυτήτων, η μεταβολή της κλίσης και η καμπυλότητα της χάραξης είναι τόσο μικρές, που δίνουν την εικόνα ευθειών γραμμών. Υπάρχει επομένως λίγος χώρος για απόκλιση είτε από το καθορισμένο αζιμούθιο είτε από την κλίση μιας μακριάς σήραγγας τρένων υψηλών ταχυτήτων.

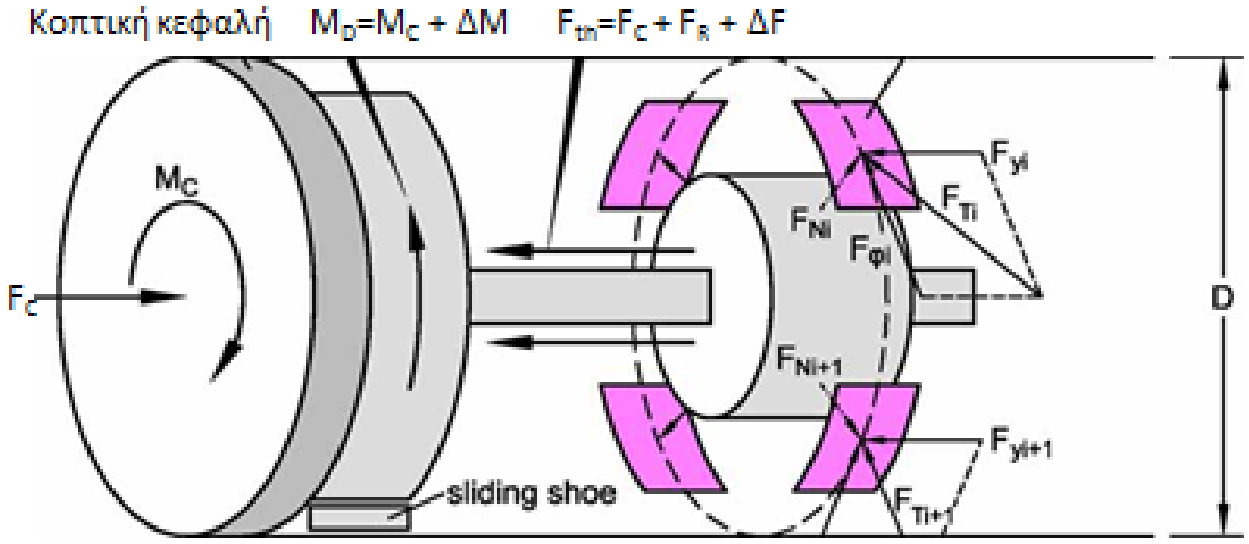
Κατά τη διάρκεια της διάνοιξης καταγράφονται και ελέγχονται: η δύναμη προώθησης, η πίεση του εμβόλου προώθησης, η δύναμη προώθησης στην κοπτική κεφαλή, οι στροφές της κοπτικής κεφαλής, το αζιμούθιο της μηχανής και η θέση στην οποία βρίσκεται, και η σχετική θέση της μηχανής σε σχέση με τη χάραξη.

7.4 Ώση και Ροπή μηχανών ανοικτού μετώπου

Η προεκτίμηση της απαιτούμενης ώσης και ροπής της μηχανής για την υπερνίκηση των αντιστάσεων κατά τη διάνοιξη, είναι πρωταρχικής σημασίας. Μια λανθασμένη διαστασιολόγηση των μονάδων διάνοιξης μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές δυσκολίες, με αποκορύφωμα την υπόγεια αναδιαμόρφωση της μηχανής, που θα πρέπει να αποφεύγεται μέσω προσεκτικού σχεδιασμού.

7.4.1 Ώση

Η απαιτούμενη ώση F_T (Wittke, 2007) για ένα TBM-G μπορεί γενικά να υπολογιστεί ως το άθροισμα της ώσης των κοπτικών δίσκων F_C, της αντίστασης του ολισθαίνοντος πέδιλου F_F και ενός περιθωρίου ασφαλείας ΔF.



Σχήμα 7-13. Ώση, ροπή στρέψης, και δύναμη πάκτωσης ωστήρων, ενός TBM

$$F_T = F_C + F_F + \Delta F$$

(7-3)

7.4.1.1 Διείσδυση κοπτικών δίσκων

Η αντίσταση των κοπτικών δίσκων υπολογίζεται ως το άθροισμα των αντιστάσεών τους.

$$F_C = \sum_{i=1}^{n_d} F_{ci}\,;\forall F_{ci} = F_c \Rightarrow F_C = n \cdot F_c$$

(7-4)

όπου, n_d: αριθμός κοπτικών δίσκων, F_{ci}: ώση δίσκου i, F_c: θεωρούμενη κοινή τιμή ώσης για όλους τους κοπτικούς δίσκους. Ο αριστερά τύπος στη σχέση (7-4) είναι γενικός. Ο δεξιά τύπος προκύπτει από τον γενικό, στην περίπτωση που οι ώσεις των κοπτικών είναι όλες ίσες με F_c. Οι Roxborough & Philips (1975) υπολογίζουν τη απαιτούμενη ώση F_c του κάθε κοπτικού δίσκου σύμφωνα με την:

$$F_c = 4 \cdot \sigma_{ci} \cdot tan\frac{\alpha_d}{2} \cdot \delta_p \cdot \sqrt{d_d \cdot \delta_p - \delta_p^2}$$

(7-5)

όπου, δ_p: διείσδυση κοπτικού δίσκου στο πέτρωμα, d_d: διάμετρος κοπτικού δίσκου, α_d: γωνία αιχμής δίσκου, σ_{ci}: μονοαξονική αντοχή του πετρώματος.

7.4.1.2 Τριβή μεταξύ μηχανής και εδάφους

Εφόσον το άνοιγμα είναι ευσταθές κατά την προχώρηση, η αντίσταση τριβής περιορίζεται στην ολίσθηση της μηχανής στην περιοχή του αναστρόφου. Στην περίπτωση αυτή η αντίσταση F_F ολίσθησης της μηχανής επί της γεωμάζας στην περιοχή του αναστρόφου θεωρείται ότι ισούται με το βάρος W_{EPBnt} της μηχανής επί το συντελεστή τριβής μ_f μεταξύ μηχανής και πετρώματος.

$$F_F = \mu_f \cdot W_{EPBnt}$$

(7-6)

Ο συντελεστής τριβής, που γενικά λαμβάνει τιμές 0.3÷0.4, αυξάνει με τις ανωμαλίες και την αδρότητα της περιβάλλουσας γεωμάζας, και ειδικότερα λαμβάνει τιμές 0.2, 0.3, 0.35, 0.45, 0.55, για αργίλους, ιλύες, μάργες, άμμους, και χάλυκες, αντίστοιχα.

7.4.2 Ροπή στρέψης

Αντίστοιχα (Wittke, 2007) η απαιτούμενη ροπή στρέψης M_T είναι το άθροισμα της απαιτούμενης ροπής M_C για την περιστροφή των κοπτικών δίσκων, της ροπής M_H αντίστασης του εδάφους εμπρός από την κοπτική κεφαλή, και ενός περιθωρίου ασφαλείας ΔΜ για μη μόνιμες απαιτήσεις, όπως η πρόσθετη ροπή εκκίνησης.

$$M_T = M_C + M_H + \Delta M \tag{7-7}$$

7.4.2.1 Αντίσταση κύλισης των δίσκων

Η δύναμη κύλισης των δίσκων συναρτάται με τη δύναμη ώσης των δίσκων στο πέτρωμα. Οι Roxbourough & Phillips (1975) και ο Hughes (1986) δίνουν αντίστοιχα τις ακόλουθες σχέσεις για το λόγο της δύναμης κύλισης F_r προς τη δύναμη ώσης F_c, συναρτήσει της διείσδυσης δ_p και της διαμέτρου του δίσκου d_d:

$$\frac{F_r}{F_c} = \sqrt{\frac{\delta_p[mm/rev]}{d_d[mm] - \delta_p[mm/rev]}}\ (Roxborough\ \&\ Phillips);\ \frac{F_r}{F_c} = 0.65 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \delta_p[mm/rev]}{d_d[mm]}}(Hughes) \tag{7-8}$$

Οπότε, η ροπή στρέψης M_C για την κύλιση των δίσκων, σύμφωνα με τους Roxbourough & Phillips, δίνεται από την:

$$M_C = \sum_{i=1}^{n_d} F_{ri} \cdot r_i = \left(\sum_{i=1}^{n_d} F_{ci} \cdot r_i\right) \cdot \sqrt{\frac{\delta_p}{d_d - \delta_p}};\ \forall F_{ci} = F_c \Rightarrow\ M_C = F_c \cdot \sqrt{\frac{\delta_p}{d_d - \delta_p}} \cdot \sum_{i=1}^{n_d} r_i \tag{7-9}$$

Όπου, F_{ri} η αντίσταση κύλισης σε κάθε δίσκο i σε απόσταση r_i από τον άξονα περιστροφής. Η αριστερή σχέση είναι γενική. Η δεξιά προκύπτει από την γενική, στην περίπτωση που οι ώσεις των κοπτικών είναι όλες ίσες με F_c.

7.4.2.2 Τριβή θραυσμάτων στο μέτωπο

Απώλεια ροπής M_H προκαλείται από το εκσκαμμένο πέτρωμα, που βρίσκεται μεταξύ του μετώπου και της κοπτικής κεφαλής, και εξαναγκάζεται σε περιστροφή. Η απώλεια αυτή εξαρτάται από τη διάμετρο και από τις συνθήκες του πετρώματος, αυξάνεται με το ρυθμό διείσδυσης και μειώνεται με την αύξηση του αριθμού των ανοιγμάτων αποκόμισης (Schmid, 2004). Για μια σήραγγα διαμέτρου 12m, η απώλεια ροπής είναι της τάξης των 1 έως 2 MNm.

7.4.3 Διαβίβαση δυνάμεων και ροπών στο πέτρωμα

Τα ωστήρες πάκτωσης μεταφέρουν τις δυνάμεις ώσης και ροπής στρέψης από τη μηχανή στο περιβάλλον πέτρωμα. Αν ο αριθμός των ωστήρων είναι k_{gr}, τότε, για ομοιόμορφη κατανομή των δυνάμεων, σε κάθε πέδιλο i δρουν δυνάμεις F_{gxi} $F_{g\theta i}$, κατά τη διεύθυνση και εφαπτομενικά στην περιφέρεια της σήραγγας αντίστοιχα, που δίνονται με τη συνισταμένη τους F_{gRi}, από τις σχέσεις:

$$F_{gxi} = \frac{F_T}{k_{gr}};\ F_{g\theta i} = \frac{2 \cdot M_T}{k_{gr} \cdot D};\ F_{gRi} = \sqrt{F_{gxi}^2 + F_{g\theta i}^2} \tag{7-10}$$

Αυτή η συνισταμένη εφαπτομενική δύναμη, αναλαμβάνεται με δυνάμεις τριβής, λόγω της ώσης, F_{gNi}, πάκτωσης των ωστήρων, σύμφωνα με τη σχέση:

$$F_{gNi} = \frac{F_{gRi}}{\mu_{gr}};\ F_{gNi,d} = F_{gNi} \cdot SF_{gr} \tag{7-11}$$

όπου: μ_{gr} συντελεστής τριβής μεταξύ πετρώματος και χάλυβα των ωστήρων, SF_{gr} συντελεστής επαύξησης (ασφαλείας) δράσεων, και $F_{gNi,d}$ η ώση σχεδιασμού. Οι δυνάμεις ώσης F_{gNi} των πεδίλων προκαλούν εγκάρσιες εφελκυστικές τάσεις που μειώνουν τις θλιπτικές τάσεις στην περιφέρεια της εκσκαφής, με αποτέλεσμα την πρόκληση χαλάρωσης ή ολίσθησης τεμαχών στην περιφέρεια και ιδιαίτερα στην οροφή της εκσκαφής. Επιπλέον, δύναται να προκληθεί διατμητική αστοχία στο πέτρωμα κάτω από τους ωστήρες. Ως εκ τούτου θα πρέπει να επιβεβαιωθεί, συνήθως με αναλύσεις π.σ., ότι οι ώσεις των πέδιλων δύνανται να αναληφθούν από το περιβάλλον πέτρωμα.

Για παράδειγμα, ας θεωρηθεί μηχανή TBM της Wirth, διαμέτρου κεφαλής D_h=10m, με σύστημα ωστήρων πάκτωσης χιαστί τοποθετημένων στις ±35° σε σχέση με την οριζόντια, σε δύο κάθετες στον άξονα διατομές σε απόσταση μεταξύ τους 6m. Η δύναμη ώσης και η ροπή στρέψης είναι F_T=20MN και M_T=8MNm, αντίστοιχα. Αν, ο συντελεστής δράσεων είναι SF_{gr}=1.2 και ο συντελεστής τριβής μ_{gr}=0.35, τότε:

$$F_{gxi} = \frac{F_T}{k_{gr}} = \frac{20}{8} = 2.5MN;\ F_{g\theta i} = \frac{2 \cdot M_T}{k_{gr} \cdot D} = \frac{2 \cdot 8}{8 \cdot 10} = 0.2MN$$

$$F_{gRi} = \sqrt{F_{gxi}^2 + F_{g\theta i}^2} = \sqrt{2.5^2 + 0.2^2} = 2.5MN; F_{gNi,d} = \frac{SF_{gr} \cdot F_{gRi}}{\mu_{gr}} = \frac{1.2 \cdot 2.5}{0.35} = 8.6MN$$

Τη δύναμη ώσης αυτή των ωστήρων θα πρέπει να μπορεί να την αναλάβει το πέτρωμα, τόσον σε θλίψη κάτω από το πέδιλο όσον και χωρίς χαλάρωση των ασυνεχειών σε γειτονικές των ωστήρων περιοχές, κυρίως της στέψης.

7.5 Στήριξη του πετρώματος

Λίγες σήραγγες δεν απαιτούν ούτε προσωρινή υποστήριξη ούτε μόνιμη επένδυση. Η πλειοψηφία τους απαιτεί κάποιο βαθμό δομικής υποστήριξης και επένδυσης για την προστασία από πτώσεις βράχου ή εισροή υπόγειων νερών ή για υδραυλική ομαλότητα. Η χρήση των σηράγγων και οι γεωτεχνικές συνθήκες καθορίζουν την ανάγκη για μια τελική επένδυση. Το μέγεθος και η έκταση της υποστήριξης και της επένδυσης εκτιμώνται κατά την κοστολόγηση του έργου. Η ακρίβεια τέτοιων εκτιμήσεων αποτελεί σύνηθες θέμα δικαστικών διεκδικήσεων κατά την κατασκευή σηράγγων. Εάν το χρονοδιάγραμμα του έργου και οι γεωτεχνικές συνθήκες το επιτρέπουν, ο ανάδοχος θα προτιμήσει συνήθως να εγκαταστήσει τη μόνιμη επένδυση στη σήραγγα, εφόσον απαιτείται, αφότου ολοκληρωθεί η εκσκαφή. Αυτό επιτρέπει την πραγματοποίηση της εκσκαφής και προσωρινής υποστήριξης, με πολύ απλούστερη επιμελητεία. Η σήραγγα μπορεί στη συνέχεια να επενδυθεί με έγχυτο σκυρόδεμα ταχύτερα, και ο εξοπλισμός να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικότερα, χρησιμοποιώντας κινούμενους μεταλλότυπους όταν αφαιρεθούν τα καλώδια και οι σωλήνες που φέρνουν αέρα, ισχύ, τηλεπικοινωνία, και νερό στο μέτωπο.



Σχήμα 7-14. (1) Διατρητικά για την τοποθέτηση αγκυρίων. (2) Εξοπλισμός για την εκτόξευση σκυροδέματος.

Το ΤΒΜ με ωστήρες πάκτωσης έχει συνήθως μια κοντή ασπίδα κοπτικής κεφαλής που καταλήγει αμέσως πίσω από αυτή, έτσι ώστε τα μέτρα στήριξης να μπορούν να τοποθετηθούν κοντά στο μέτωπο. Ο εξοπλισμός της άμεσης στήριξης του πετρώματος βρίσκεται πίσω από την κοπτική κεφαλή, όσο το δυνατόν κοντύτερα στο μέτωπο. Αυτός συνήθως αποτελείται, ανάλογα με την ποιότητα του πετρώματος, από σχετικά απλά διατρητικά (Σχήμα 7-14, 1) και ανυψωτές χαλύβδινων πλαισίων και πλέγματος. Σε αυτήν την περιοχή υπάρχουν επίσης συνήθως και διατρητικά για διερευνητικές γεωτρήσεις ή εισπίεση ενεμάτων. Πιο πίσω βρίσκεται, σε ειδικά διαμορφωμένο χώρο, μηχανή για εκτόξευση σκυροδέματος (Σχήμα 7-14, 2).

Αν το πέτρωμα είναι μόνο ελαφρά θραυσμένο, δηλαδή περιστασιακά μόνο αναμένονται θέσεις για μικρές πτώσεις βράχων, μπορεί να αρκεί η υποστήριξη της οροφής από μια ασπίδα στέψης, που θα προστατεύει τους εργαζόμενους από πτώσεις βράχων. Εφόσον απαιτούνται χρησιμοποιούνται συμβατικά μέσα υποστήριξης πάνω ή μπροστά από την κεφαλή κοπής, όπως ηλώσεις βράχου, χαλύβδινα πλαίσια, και δοκίδες προπορείας. Σε ζώνες ρηγμάτων δύνανται επίσης να χρησιμοποιούνται ενέσεις ή ακόμη και πάγωμα του πετρώματος, οι οποίες σταθεροποιούν το πέτρωμα επαρκώς ώστε να καθίσταται δυνατή η περαιτέρω διάνοιξη με το ΤΒΜ. Ο ρυθμός προχώρησης όμως, μπορεί να μειωθεί σημαντικά ή και να μηδενιστεί από την προσπάθεια που απαιτείται για την εγκατάσταση των μέτρων στήριξης που απαιτούνται.

Η χρήση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, γύρω από τη μηχανή αμέσως πίσω από την κοπτική κεφαλή, δεν έχει μέχρι σήμερα επιτευχθεί ικανοποιητικά λόγω των προβλημάτων που προκαλεί η αναπήδηση. Εξαίρεση αποτελούν τα ΤΒΜ διεύρυνσης, όπου ολόκληρη η διατομή της σήραγγας πίσω από την κοπτική κεφαλή είναι διαθέσιμη για όλα τα μέτρα στήριξης όπως και το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

Στη σύγχρονη σηραγγοποιία με ΤΒΜ με ωστήρες πάκτωσης, στον πυθμένα τοποθετείται ανάστροφο προκατασκευασμένο στοιχείο από οπλισμένο σκυρόδεμα. Αυτό το στοιχείο αποτελεί προσωρινή και μόνιμη υποστήριξη και μπορεί να εξοπλιστεί με βάσεις, για τις τροχιές του οπίσθιου φορείου του συρμού εξυπηρέτησης και του σιδηροδρομικού μεταφορέα, έτσι ώστε οι σιδηροτροχιές να μπορούν να εγκατασταθούν αμέσως. Οι σωλήνες αποχέτευσης μπορούν επίσης να ενσωματωθούν στο ανάστροφο στοιχείο.

7.6 Συρμός εξυπηρέτησης

Η διάνοιξη από ένα ΤΒΜ, απαιτεί σύστημα εξασφάλισης προμηθειών, ελέγχου, και διάθεσης αποβλήτων, καθώς και πλατφόρμες εργασίας για τις διάφορες δραστηριότητες. Ως φορέας για το σύστημα αυτό χρησιμεύει μια μεταλλική κατασκευή, που ακολουθεί τη διάνοιξη πίσω από τη μηχανή της σήραγγας και ονομάζεται συρμός εξυπηρέτησης. Αυτός εμπεριέχει όλες τις βοηθητικές εγκαταστάσεις παροχής ενέργειας, υποστήριξης, αερισμού, οδήγησης, μεταφοράς υλικών, κλπ, για τη διάνοιξη της σήραγγας. Οι εγκαταστάσεις παροχής ενέργειας περιλαμβάνουν το υψηλής τάσης εξέλικτρο ηλεκτρικών καλωδίων, τους μετασχηματιστές με το σύστημα διανομής, ηλεκτρικούς πίνακες, υδραυλικά συστήματα και πιεσμένο αέρα. Τα συστήματα υποστήριξης περιλαμβάνουν εξοπλισμό μεταφοράς, απόθεσης και τοποθέτησης στοιχείων, όπως ανυψωτές και χώρους απόθεσης προκατασκευασμένων τόξων και στοιχείων δαπέδου, αντλίες ενεμάτωσης του δακτυλιοειδούς διακένου, εξοπλισμό διάτρησης, ανυψωτές χαλύβδινων τόξων και δομικού πλέγματος. Ο εξοπλισμός αερισμού περιλαμβάνει αντλίες και σωλήνες εξαερισμού, και αποκονιωτές. Ο εξοπλισμός

οδήγησης βρίσκεται στο θάλαμο του οδηγού Ο εξοπλισμός μεταφοράς περιλαμβάνει τον ταινιόδρομο των μπαζών, το σταθμό μεταφοράς των υλικών, τη θέση συναρμολόγησης και επέκτασης της ταινίας, και την προσωρινή απόθεση των μπαζών. Υπάρχουν επίσης, ο εξοπλισμός τοποθέτησης των τροχιών και καλωδίων ηλεκτροκίνησης, οι σωληνώσεις ύδατος και αποστράγγισης, και τα αποδυτήρια των εργαζομένων. Ο μεταλλικός φορέας του συρμού εξυπηρέτησης έλκεται συνήθως από το ΤΒΜ και μετακινείται επί σιδηροτροχιών ή ολισθαίνει επί ελκήθρων.

Προς το μέτωπο οδηγούνται τα μέτρα στήριξης, όπως ποσότητες εκτοξευόμενου σκυροδέματος, στοιχεία χαλύβδινων πλαισίων και ήλοι. Επίσης, στον πολύ περιορισμένο διαθέσιμο χώρο της σήραγγας, μεταφέρονται με δυσκολία τα μεγάλα προκατασκευασμένα στοιχεία του αναστρόφου. Στην αντίθετη κατεύθυνση πάνω σε μεταφορικό ιμάντα απομακρύνονται από το μέτωπο τα μπάζα. Εντός του συρμού εξυπηρέτησης φορτώνονται από τη μεταφορική ταινία τα μπάζα σε σύστημα περαιτέρω αποκόμισης. Εφόσον χρησιμοποιούνται φορτηγά ή βαγονέτα για την αποκόμιση των μπαζών απαιτείται μεγάλος χώρος προσωρινής απόθεσης, ώστε να είναι σε θέση να αντισταθμιστεί η μετάβαση από τη συνεχή λειτουργία του μεταφορικού ιμάντα στη διακοπτόμενη λειτουργία των βαγονέτων αποκόμισης ή των ανατρεπόμενων οχημάτων χωρίς αρνητικές επιπτώσεις στη μονάδα ΤΒΜ. Για το μεταφορικό ιμάντα, απαιτείται εξοπλισμός επέκτασης του μήκους του. Επίσης, ο αγωγός για τον κύριο εξαερισμό επεκτείνεται κατά τη προχώρηση συνεχώς προς τα έξω, από το τέλος του πλαισίου του συρμού εξυπηρέτησης, και αναρτάται με καλώδια κάτω από τη στέψη.

Ο συρμός εξυπηρέτησης κατασκευάζεται συχνά λαμβάνοντας υπόψη μηχανολογικά και τεχνικά θέματα, όπως χώρο για τον απαιτούμενο μηχανολογικό εξοπλισμό και ανοιχτή οπτική γραμμή για την καθοδήγηση με το λέιζερ, παραμελώντας λειτουργικές απαιτήσεις, όπως ύπαρξη ελεύθερου χώρου για τους αγωγούς εξαερισμού χωρίς αλλαγές κατεύθυνσης και διατομής που θα επέφεραν πρόσθετη απώλεια πίεσης αέρα. Ο εξοπλισμός εξυπηρέτησης πρέπει πρώτιστα να εξασφαλίζει την οικονομική και ασφαλή διάνοιξη της σήραγγας, λαμβάνοντας κατά τη διαμόρφωσή του προτεραιότητες όπως: (α) ασφαλείς διαδρομές πεζών, συμπεριλαμβανομένων των διαδρομών κινδύνου, (β) τακτοποιημένοι αεραγωγοί, σωληνώσεις και καλώδια, χωρίς στροφές και γωνίες, (γ) διάδρομος για τον μεταφορικό ιμάντα, (δ) παράθυρο ανοικτό για το λέιζερ, και (ε) χώροι για εργασία με ασφάλεια. Στη συνέχεια μπορούν να τοποθετηθούν οι συσκευές και ο εξοπλισμός στις υπόλοιπες θέσεις. Συμβιβασμοί είναι αναπόφευκτοι σε σήραγγες μικρής διαμέτρου. Η κατάσταση μπορεί να απλοποιηθεί αν η φέρουσα χαλύβδινη κατασκευή του συρμού μπορεί να μεταφέρει τα καλώδια, χρησιμοποιώντας ως σκελετό αντί για τυπικές ανοικτές διατομές, σωλήνες επαρκούς διαμέτρου εντός των οποίων να βρίσκονται τα καλώδια.

7.7 Μέτρηση της χρονικής επίδοσης

Η διείσδυση από μόνη της δεν καθορίζει εκ των προτέρων την πραγματική προχώρηση για μια συγκεκριμένη περίοδο. Ο πραγματικός ρυθμός προχώρησης επηρεάζεται από άλλους παράγοντες επίσης, όπως η υποστήριξη του πετρώματος, η αλλαγή των κοπτικών, οι επισκευές και η αποτελεσματικότητα του συρμού εξυπηρέτησης για την απομάκρυνση των προϊόντων της εκσκαφής και την παροχή υλικών κατασκευής και προμηθειών. Ο μέσος ρυθμός προχώρησης των ΤΒΜ με ωστήρες είναι συχνά μόνο το 35% της προχώρησης αιχμής. Αύξηση του ρυθμού διείσδυσης επιτυγχάνει γενικά μικρή βελτίωση. Συχνά, είναι αποτελεσματικότερη η βελτίωση του συστήματος αλλαγής των κοπτικών, και του συστήματος υποστήριξης έναντι καταπτώσεων.

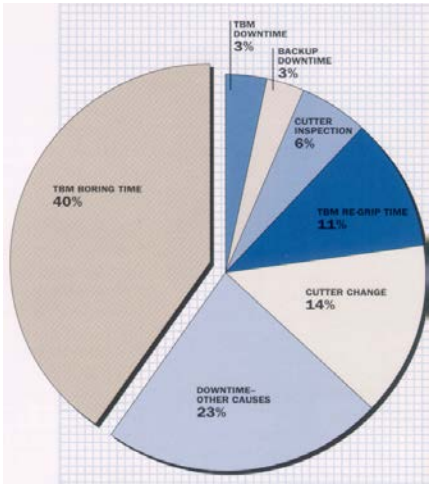
Η μέτρηση της χρονικής επίδοσης ενός ΤΒΜ εξυπηρετεί ανάγκες του ανάδοχου, του κατασκευαστή, του κύριου του έργου και του μηχανικού της σήραγγας, που είναι διαφορετικές. Ο ανάδοχος ενδιαφέρεται για το ποσοστό του χρόνου που το ΤΒΜ διανοίγει σήραγγα. Ο κατασκευαστής ενδιαφέρεται, επιπλέον, για το ποσοστό του χρόνου που το ΤΒΜ ήταν διαθέσιμο για να λειτουργήσει δεδομένου ότι, για λόγους πέρα από τον έλεγχο του κατασκευαστή, το ΤΒΜ μπορεί να μην είχε χρησιμοποιηθεί στην πλήρη ικανότητά του. Ο κύριος του έργου έχει επίσης το ίδιο ενδιαφέρον. Ο μελετητής της σήραγγας ενδιαφέρεται επίσης για το στιγμιαίο ρυθμό προχώρησης του ΤΒΜ στο πέτρωμα, δηλαδή την ταχύτητα με την οποία το ΤΒΜ μπορεί να διατρήσει το πέτρωμα για μικρές χρονικές περιόδους. Όλοι ενδιαφέρονται για την πρόβλεψη του μελλοντικού ρυθμού προχώρησης αναλύοντας και διορθώνοντας τα προβλήματα. Κατά τη διάρκεια των πρώτων ημερών, της εκμάθησης, τα ΤΒΜ, οι χειριστές και οι εργάτες έχουν προβλήματα. Ο στόχος κατά τη διάρκεια αυτών των ημερών είναι να καθοριστούν η βέλτιστη ώση, η ροπή, και η φθορά κοπτών για το πέτρωμα, να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος του κύκλου, και να οριστεί για τους εργάτες μια σταθερή και ασφαλής βάρδια. Οι πρόοδοι στο σχεδιασμό των κοπτών και στη μεταλλουργία έχουν βελτιώσει την απόδοση και το κόστος εκσκαφής του

πετρώματος. Η σύμβαση του κατασκευαστή του TBM είναι πιθανό να περιέχει εγγυήσεις για το μήκος κοπής κάθε κόπτη, αν και σε όλα εκτός από τα σκληρότερα πετρώματα, ο χρόνος διακοπής για άλλους λόγους είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερος από το χρόνο διακοπής για την αλλαγή των κοπτών.

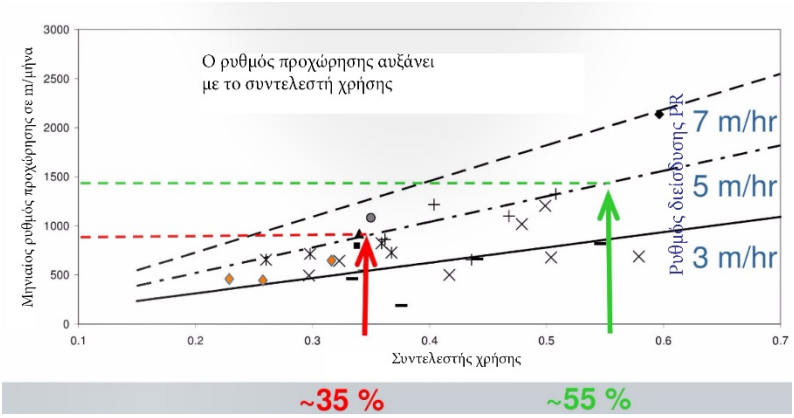
7.7.1 Δραστηριότητες

Στη μέτρηση της επίδοσης του TBM, ο χρόνος αδυναμίας του συρμού εξυπηρέτησης έχει επιπτώσεις στη διαθεσιμότητα του TBM και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη. Ο υπολογισμός της λειτουργίας επομένως θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη του αδυναμίες από τη μηχανή μέχρι και την τελευταία κινούμενη μονάδα του συρμού εξυπηρέτησης που προχωρεί με το TBM (Sutcliffe, 1996). Έξι δραστηριότητες σχετίζονται με την επίδοση της μηχανής:

Α. Ο χρόνος που το TBM κόβει το πέτρωμα (π.χ. 40% του συνολικού χρόνου).
Β. Ο χρόνος που η κοπτική κεφαλή αδρανεί επειδή πραγματοποιούνται λειτουργίες σε άλλα μέρη του TBM. Π.χ., η μετατόπιση των ωστήρων αντιστήριξης και η τοποθέτηση στοιχείων υποστήριξης του πετρώματος (π.χ. 11% του συνολικού χρόνου).
Γ. Ο μη προγραμματισμένος χρόνος διακοπής για τη συντήρηση ή την επισκευή του TBM (π.χ. 3% του συνολικού χρόνου).
Δ. Ο μη προγραμματισμένος χρόνος διακοπής για τη συντήρηση ή την επισκευή του συρμού εξυπηρέτησης (π.χ. 23% του συνολικού χρόνου).
Ε. Ο προγραμματισμένος χρόνος διακοπής για τη συντήρηση του TBM (π.χ. 20% του συνολικού χρόνου).
Ζ. Ο προγραμματισμένος χρόνος διακοπής για τη συντήρηση του εξοπλισμού εξυπηρέτησης (π.χ. 3% του συνολικού χρόνου).



(α) Διάγραμμα επίδοσης



(β) Αύξηση του μηνιαίου ρυθμού προχώρησης (MAR) με την αύξηση του ποσοστού χρήσης, για τοον ίδιο ρυθμό διάτρησης (PR)

Σχήμα 7-15. Επίδοση TBM

Στο Σχήμα 7-15α δίνεται παράδειγμα κατανομής των χρόνων των διαφόρων δραστηριοτήτων διάνοιξης σήραγγας. Θα φαινόταν ότι είναι απλό θέμα ο υπολογισμός, από τα αρχεία του έργου, της επίδοσης, της αξιοπιστίας, και της διάρκειας. Εντούτοις, τα καταγραμμένα στοιχεία για τη διαθεσιμότητα και τη χρησιμοποίηση μιας μηχανής σημαίνουν λίγο ή τίποτα, εκτός αν οι λεπτομέρειες των δραστηριοτήτων είναι γνωστές και τυποποιημένες. Αλλά, και στην περίπτωση που υπάρχει τυποποίηση, η μεγάλη ποικιλία των κατασκευαζόμενων σηράγγων καθιστά τη σύγκριση δύσκολη.

Εφόσον ένα TBM λειτουργεί δύο βάρδιες ημερησίως, η προγραμματισμένη συντήρηση τόσο στο TBM όσο και στο συρμό εξυπηρέτησης προγραμματίζεται για μετά από τις ώρες απασχόλησης. Κατά συνέπεια, η προγραμματισμένη συντήρηση δεν έχει επιπτώσεις στη διαθεσιμότητα της μηχανής, η οποία μπορεί να φτάνει το 100%. Εντούτοις, σε ένα έργο όπου το TBM λειτουργεί 24 ώρες την ημέρα, η προγραμματισμένη συντήρηση μειώνει τη διαθεσιμότητα κάτω του 100%. Για να αποκατασταθεί αυτό, ο προγραμματισμένος χρόνος διακοπής της μηχανής αφαιρείται από τις ώρες απασχόλησης, και 720 ώρες μηνιαίως με 60 ώρες προγραμματισμένο χρόνο διακοπής (Ε) γίνονται 660 ώρες μηνιαίως για τους υπολογισμούς διαθεσιμότητας. Ο προγραμματισμένος

χρόνος διακοπής του εξοπλισμού εξυπηρέτησης (Z) υποτίθεται προγραμματισμένος σε αυτήν την ίδια περίοδο και αφαιρείται επίσης. Όσο πιο σύντομος ο προγραμματισμένος χρόνος της ανά 24ωρο συνολικής βάρδιας, τόσο περισσότερος χρόνος είναι διαθέσιμος για τη συντήρηση και την επισκευή, και τόσο υψηλότερη αναμένεται η διαθεσιμότητα. Συνήθεις βάρδιες διαρκούν από 7 έως 10 ώρες. Το άθροισμα των στοιχείων Α έως Z είναι συνήθως 24 ώρες.

Ένα άλλο μέτρο της αποδοτικότητας της λειτουργίας της μηχανής είναι ο χρόνος κύκλου εργασιών. Αυτός εμπεριέχει τις εργασίες: εκσκαφή, απομάκρυνση των μπαζών, στήριξη του πετρώματος ή/και τοποθέτηση της άμεσης επένδυσης, επανατοποθέτηση των ωστήρων, μέχρι την επανεκκίνηση της εκσκαφής.

7.7.2 Παράμετροι χρονικής επίδοσης

Σήμερα υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός κατασκευαστών μηχανών με συγκρίσιμα τεχνικά χαρακτηριστικά. Οι μέγιστες ταχύτητες που επιτυγχάνονται είναι 70 έως 80 μέτρα την ημέρα για διαμέτρους εκσκαφής 7 μέτρα (υδαταγωγός σήραγγα, Καλιφόρνια). Εάν αποκλειστεί από τη μέτρηση ο προγραμματισμένος χρόνος για τη συντήρηση του ΤΒΜ (Ε) και του εξοπλισμού εξυπηρέτησης (Z), παραμένουν τέσσερις δραστηριότητες, οι οποίες μας δίνουν τις παραμέτρους επίδοσης, που ορίζονται: διαθεσιμότητα, χρήση, ρυθμός διάτρησης και μηνιαίος ρυθμός προχώρησης. Η λειτουργία μπορεί να οριστεί είτε ως Α είτε ως Α + Β.

Διαθεσιμότητα του ΤΒΜ. Ορίζεται ως το ποσοστό των προγραμματισμένων ωρών βάρδιας που ένα ΤΒΜ είναι διαθέσιμο για να εκσκάψει και να φορτώσει τα μπάζα στο σύστημα αποκόμισης. Το ποσοστό της διαθεσιμότητας μπορεί να οριστεί εναλλακτικά επομένως:

$$\frac{\text{Α} + \Delta}{\text{Α} + \text{Β} + \Gamma + \Delta} \times 100 \text{ ή } \frac{A + \text{Β} + \Delta}{A + B + \Gamma + \Delta} \times 100$$

(7-12)

Χρήση του ΤΒΜ. Είναι ένα μέτρο για το πόσο πλήρως χρησιμοποιείται ένα διαθέσιμο ΤΒΜ. Το ποσοστό χρήσης ορίζεται:

$$\frac{\text{Α}}{\frac{A + \Delta}{A + B + \Gamma + \Delta}} \times 100 \text{ ή } \frac{A + \text{Β}}{\frac{A + \text{Β} + \Delta}{A + B + \Gamma + \Delta}} \times 100$$

(7-13)

Οι παραπάνω εναλλακτικοί όροι απαιτούν είτε τυποποίηση είτε σαφή καθορισμό.

Ρυθμός διάτρησης (PR). Είναι ο ρυθμός, π.χ. σε εκατοστά ανά λεπτό, με τον οποίο η κοπτική κεφαλή της μηχανής προωθείται μέσα στο πέτρωμα. Είναι συνάρτηση της σκληρότητας και της λειαντικότητας του πετρώματος, του σχεδιασμού του μηχανισμού κοπής, της ώθησης και ταχύτητας περιστροφής της κοπτικής κεφαλής. Τα χαρακτηριστικά του πετρώματος εκτιμώνται από δείγματα. Ο σχεδιασμός του μηχανισμού κοπής θα επιτρέπει παραλλαγές στο πέτρωμα και θα βελτιστοποιεί τις δαπάνες φθοράς των κοπτών έναντι του ρυθμού προχώρησης. Στη μηχανή σκληρού πετρώματος, ο χειριστής ελέγχει συνήθως μόνο την ώση. Μολονότι, συνήθως υπάρχει καλή συνεργασία μεταξύ του κατασκευαστή της μηχανής και του αναδόχου, υπάρχουν αρκετές μεταβλητές στη φύση που δεν επιτρέπουν πάντα τη συμφωνία μεταξύ των εργαστηριακών δοκιμών στους κόπτες και των τελικών αποτελεσμάτων στο έργο. Ο ρυθμός διάτρησης υπολογίζεται με τη διαίρεση της προχώρησης δ_p της κοπτικής κεφαλής της μηχανής σε εκατοστά ανά περιστροφή, με τον χρόνο t_{rev} περιστροφής της, και μετριέται συνήθως για χρόνο προχώρησης 5 λεπτά.

$$PR = \frac{\delta_p}{t_{rev}}$$

(7-14)

Η διείσδυση ανά περιστροφή της κεφαλής δ_p, προεκτιμάται από τη σχέση:

$$\delta_p(mm) = \left(\frac{F}{F_1}\right)^b$$

(7-15)

όπου, F_1[kN]: ανηγμένη ώση για διείσδυση 1mm, F[kN]: ώση, b: εκθέτης που κυμαίνεται από 1.7 έως 2.5, για τις περισσότερες κατηγορίες πετρωμάτων

Μηνιαίος ρυθμός προχώρησης (MAR). Περιλαμβάνει τον χρόνο διάνοιξης, το χρόνο αδυναμίας λειτουργίας του TBM και τον χρόνο αχρησίας. Είναι ένα χρήσιμο μέτρο για την καταγραφή της προόδου, αλλά δεν δίνει καμία ένδειξη των αιτίων ταχείας ή αργής προόδου. Προσπάθεια εκτίμησής του δίνεται από τον Barton (2000). Πολλαπλασιασμένος ο ρυθμός με το εμβαδόν διατομής της εκσκαφής της σήραγγας, δίνει το ρυθμό όγκου εκσκαφής ανά μήνα, που αποτελεί χρησιμότερο στοιχείο. Στο Σχήμα 7-15 παρατηρούμε την αύξηση του ρυθμού προχώρησης με τη χρήση της μηχανής.

Ρυθμός προχώρησης του έργου (AR). Είναι ο μέσος ρυθμός προχώρησης για την κατασκευή σε χρόνο T[h] του μήκους L[m] της σήραγγας.

7.7.3 Διάρκεια κατασκευής σηράγγων από TBM ανοικτού μετώπου

Ο ρυθμός προχώρησης (AR) είναι το γινόμενο της χρησιμοποίησης U (Utilization) του TBM επί το ρυθμό διάτρησης PR[m/h]. Ως χρησιμοποίηση του TBM ορίζεται το ποσοστό του συνολικού χρόνου που το TBM κόβει το πέτρωμα, δηλ.

$$U = \frac{\mathrm{A}}{T} = \frac{\mathrm{A}}{\mathrm{A} + \mathrm{B} + \Gamma + \Delta + \mathrm{E} + \mathrm{Z}}$$

(7-16)

Σύμφωνα με τον Barton (2000) η χρησιμοποίηση του TBM είναι συνάρτηση της ποιότητας του πετρώματος Q, του πορώδους του n[%], του ποσοστού του σε χαλαζία q[%], της διαμέτρου της σήραγγας D[m], του δείκτη ζωής (φθοράς) των κοπτικών CLI και του χρόνου διάνοιξης T[h]. Ο υπολογισμός του ρυθμού προχώρησης του έργου και συνεπώς του συνολικού χρόνου κατασκευής μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με τις ακόλουθες σχέσεις.

$$L = AR \times T = PR \times A \Rightarrow \frac{AR}{PR} = \frac{A}{T} = U$$

$$U = T^m \Rightarrow A = T^{m+1} \Rightarrow T = \left(\frac{L}{PR}\right)^{1/1+m} \Rightarrow \frac{L}{AR} = \left(\frac{L}{PR}\right)^{1/1+m} \Rightarrow$$

$$\boxed{AR = PR^{1/1+m} \times L^{m/1+m}}$$

(7-17)

$$m = m_1 \times \left(\frac{D}{5}\right)^{0.20} \times \left(\frac{20}{CLI}\right)^{0.15} \times \left(\frac{q}{20}\right)^{0.10} \times \left(\frac{n}{2}\right)^{0.05}$$

$$m_1 = f(Q) \approx -0.2 \; \gamma\iota\alpha \; Q \geq 1 \text{ (Σχήμα 7-16)}$$

(7-18)

$$PR = 5 \times Q_{TBM}^{-0.2}$$

$$Q_{TBM} = Q_0 \times \frac{SIGMA}{F^{10}/20^9} \times \frac{20}{CLI} \times \frac{q}{20} \times \frac{\sigma_\theta}{5}$$

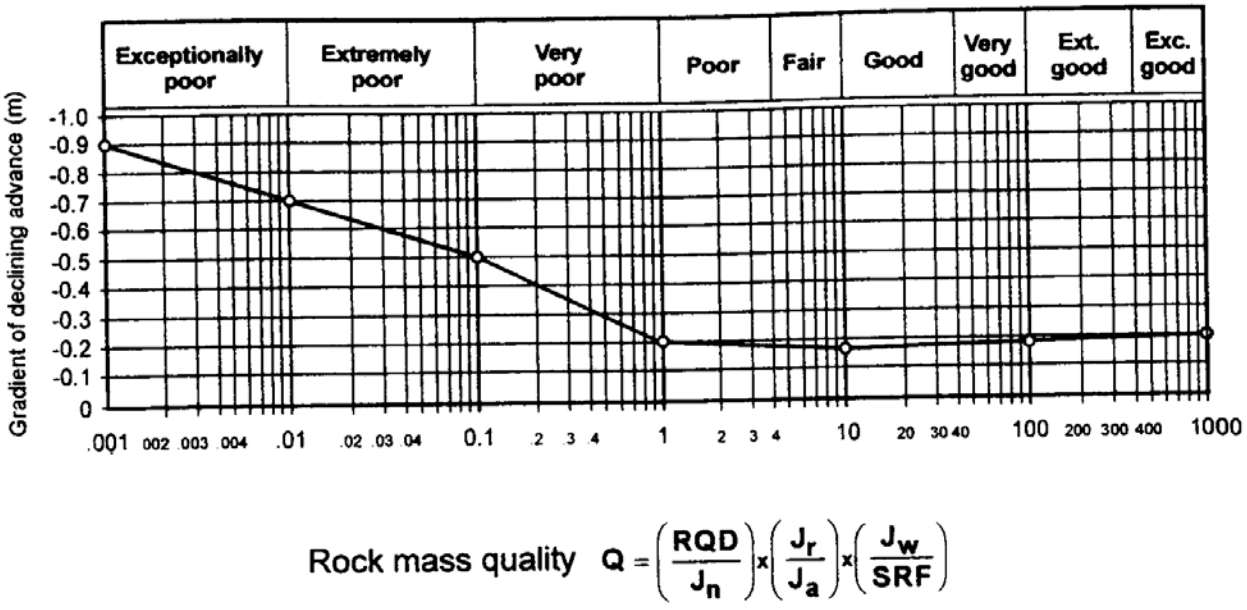
(7-19)

όπου:
L[m]: το μήκος της διάνοιξης
$SIGMA[MPa] = \{SIGMA_{cm}$ ή $SIGMA_{tm}\}$: αντοχή της βραχομάζας σε διάτρηση, λόγω θλίψης ή εφελκυσμού

$$SIGMA_{cm} = 5 \times \gamma \times Q_c^{\frac{1}{3}}; Q_c = Q_0 \times \frac{\sigma_{ci}}{100};\ SIGMA_{tm} = 5 \times \gamma \times Q_t^{1/3}; Q_t = Q_0 \times \frac{I_{50}}{4}$$

$$CLI = 14\left(\frac{SJ}{AVS}\right)^{0.4}$$

SJ: Δείκτης του Sievers; AVS: Abrasion Value Steel (βλ. κεφ. 5, παραρτ. Π1)
Q: Δείκτης ποιότητας του πετρώματος, που αφορά την ευστάθεια του ανοίγματος σύμφωνα με το σύστημα
Q_0: ο ίδιος δείκτης στη διεύθυνση διάνοιξης που αφορά τα κοπτικά, δηλαδή το RQD είναι κατά τη διεύθυνση διάνοιξης της σήραγγας και τα J_r, J_a λαμβάνονται υπόψη σαν βοηθητικά ή εμποδίζοντα την κοπή.
F[t]: δύναμη ώσης σε κάθε κοπτικό
σ_θ: η εφαπτομενική τάση στο άνοιγμα =~$2p_o$, p_o: το εντατικό πεδίο.
I_{50}: δείκτης σημειακής φόρτισης
σ_{ci}: μονοαξονική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος
γ [αδιάστατο]: ειδικό βάρος του πετρώματος



Σχήμα 7-16. Προκαταρκτική εκτίμηση του εκθέτη m_1 του ρυθμού προχώρησης.

Βιβλιογραφία

Ανδρέου Π (2003). «Μηχανές ολομέτωπης κοπής», Διπλωματική εργασία, Σχολή ΜΜΜ, ΕΜΠ

Barton N. (2000). "TBM tunnelling in jointed and faulted rock", Balkema.

Bickel JO, Kuesel TR, King EH (1996). "Tunnel Engineering Handbook", ch. 11, ITP.

DAUB (1997). "Empfehlungen zur Auswahl und Bewertung von Tunnelvortriebsmaschinen Recommendations for selecting and evaluating tunnel boring machines", (DAUB), (ÖGG) und Schweiz. Ing. Verein, Tunnel 5, 20-35.

Guglielmetti V, Grasso PG, Mahtab A, Xu S eds. (2008). Mechanized tunnelling in urban areas", Taylor & Francis, London.

Hughes HM (1986). "The relative cuttability of coal measures rock", Mining Science and Technology, Vol. 3, 95 – 109.

Maidl B (2004). "Handbuch des Tunnel- und Stollenbaus", Band I, 3. Auflage, Verlag Gluckauf.

Maidl B, Schmidt L, Ritz W, Herrenknecht M (2008). "Hard rock Tunnel Boring Machines", Ernst & Sohn, Berlin.

Roxborough FF and Phillips HR (1975). "Rock excavation by disc cutter", Int. J. Rock Mech. & Geomech. Abstr., 12, 361-366.

Schmid L (2004). "Die Entwicklung der Methodik des Schildvortriebs in der Schweiz", Geotechnik 27, Nr. 2, 193 – 200.

Sutcliffe H (1996). "Tunnel Boring Machines", ch. 11 in "Tunnel Engineering Handbook", ed. Bickel JO, Kuesel TR, King EH. Chapman & Hall, ITP.

Whittaker BN & Frith RC (1990). "Tunnelling, Design, Stability and Construction", IMM.

Wittke W, ed. (2007). "Stability analysis and design for Mechanised Tunnelling", WBI-Print 6, VGE-Verlag Gluckauf GmbH, Essen.

ΤΠ 1501-12-02-01-02 «Tunnel excavation with full-facers or roadheaders – Υπόγεια εκσκαφή σηράγγων με μηχανικά μέσα ολομέτωπης ή σημειακής κοπής», ΕΛΟΤ

Κριτήρια αξιολόγησης

Κριτήριο αξιολόγησης 1. Απαιτούμενες δυνάμεις ώσης και ροπής

Μηχανή TBM έχει διάμετρο κεφαλής D_h=9m και σύστημα ωστήρων πάκτωσης χιαστί τοποθετημένων στις ±35° σε σχέση με την οριζόντια, σε δύο κάθετες στον άξονα διατομές σε απόσταση μεταξύ τους 5m. Η δύναμη ώσης και η ροπή στρέψης είναι F_T=18MN και M_T=7MNm, αντίστοιχα. Αν, ο συντελεστής δράσεων είναι SF_{gr}=1.3 και ο συντελεστής τριβής μ_{gr}=0.40, τότε υπολογίστε την απαιτούμενη δύναμη ώσης των ωστήρων:

Απάντηση/Λύση

$$F_{gxi} = \frac{F_T}{k_{gr}} = \frac{18}{8} = 2.25MN;\ F_{g\theta i} = \frac{2 \cdot M_T}{k_{gr} \cdot D} = \frac{2 \cdot 7}{8 \cdot 9} = 0.194MN$$

$$F_{gRi} = \sqrt{F_{gxi}^2 + F_{g\theta i}^2} = \sqrt{2.25^2 + 0.194^2} = 2.26MN; F_{gNi,d} = \frac{SF_{gr} \cdot F_{gRi}}{\mu_{gr}} = \frac{1.3 \cdot 2.26}{0.40} = 7.35MN$$

Τη δύναμη ώσης των ωστήρων θα πρέπει να μπορεί να την αναλάβει το πέτρωμα, τόσον σε θλίψη κάτω από το πέδιλο όσον και χωρίς χαλάρωση των ασυνεχειών σε γειτονικές των ωστήρων περιοχές, κυρίως της στέψης.

Κριτήριο αξιολόγησης 2. Υπολογισμός της διάρκειας κατασκευής σήραγγας

Σήραγγα διαμέτρου 10.7m διανοίγεται σε βραχομάζα ψαμμίτη ποιότητας Q=11. Η τιμή του Q_0 στη διεύθυνση διάνοιξης είναι επίσης 11. Η μονοαξονική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος είναι σ_{ci}=125MPa και ο δείκτης σημειακής φόρτισης I_{50}=5. Η δύναμη ώσης κάθε κοπτικού είναι F=25t, ο δείκτης φθοράς των κοπτικών CLI=10, το ποσοστό χαλαζία q=70%, το πορώδες n=15%, και το εντατικό πεδίο p_0=4MPa. Το μήκος της διάνοιξης είναι L=4000m. Υπολογίστε τη διάρκεια διάνοιξης της σήραγγας.

Απάντηση/Λύση

$$Q_c = Q_0 \times \frac{\sigma_c}{100} = 11 \times \frac{125}{100} = \sim 14$$

$$SIGMA_{cm} = 5 \times \gamma \times Q_c^{\frac{1}{3}} = 5 \times 2.5 \times 14^{1/3} = 30MPa$$

$$Q_t = Q_0 \times \frac{I_{50}}{4} = 11 \times \frac{5}{4} = \sim 14$$

$$Q_{TBM} = Q_0 \times \frac{SIGMA}{F^{10}/20^9} \times \frac{20}{CLI} \times \frac{q}{20} \times \frac{\sigma_\theta}{5} = 11 \times \frac{30}{25^{10}/20^9} \times \frac{20}{10} \times \frac{70}{20} \times \frac{2 \times 4}{5} = 20$$

m_1=-0.17 (βλέπε Σχήμα 7-16)

$$m = m_1 \times \left(\frac{D}{5}\right)^{0.20} \times \left(\frac{20}{CLI}\right)^{0.15} \times \left(\frac{q}{20}\right)^{0.10} \times \left(\frac{n}{2}\right)^{0.05} =$$

$$= -0.17 \times \left(\frac{10.7}{5}\right)^{0.20} \times \left(\frac{20}{10}\right)^{0.15} \times \left(\frac{70}{20}\right)^{0.10} \times \left(\frac{15}{2}\right)^{0.05} = -0.27$$

$$PR = 5 \times Q_{TBM}^{-0.2} = 5 \times 20^{-0.2} = 2.7m/h$$

$$AR = PR^{1/1+m} \times L^{m/1+m} = 2.7^{1/1-0.27} \times 4000^{-0.27/1-0.27} = 0.18m/h$$

$$T = \frac{L}{AR} = \frac{4000}{0.18} = 22222h = \frac{22222h}{8760h/y} = 2.53y$$

Κριτήριο αξιολόγησης 3. Υπολογισμός παραμέτρων με χρήση του Q_{TBM}

Υπολογίστε, το (στιγμιαίο) ρυθμό διάτρησης (PR), το (μέσο) ρυθμό προχώρησης (AR) και το χρόνο ολοκλήρωσης έργου (T), των παρακάτω τριών σηράγγων:

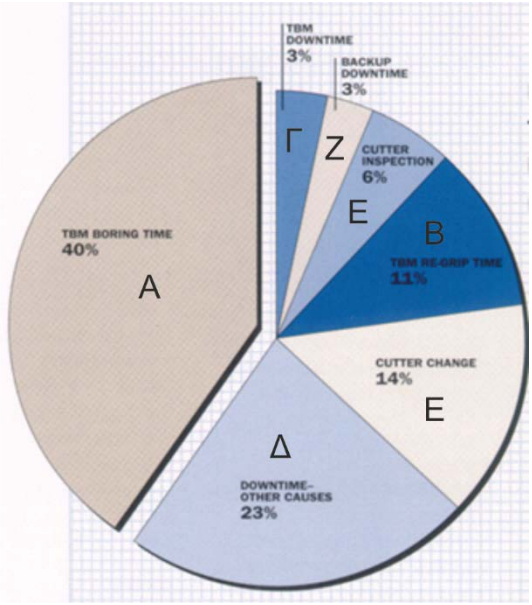
(α) Σήραγγα διαμέτρου 10.7m διανοίγεται από TBM σε βραχομάζα φυλλίτη ποιότητας Q=6. Η τιμή του Q_0 στη διεύθυνση διάνοιξης είναι 5. Η μονοαξονική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος είναι σ_{ci}=75MPa και ο δείκτης σημειακής φόρτισης I_{50}=1. Η δύναμη ώσης κάθε κοπτικού είναι F=25t, ο δείκτης φθοράς των κοπτικών CLI=20, το ποσοστό χαλαζία q=20%, το πορώδες n=5%, και το εντατικό πεδίο p_0=4MPa. Το μήκος της διάνοιξης είναι L=4000m.
(β) Σήραγγα διαμέτρου 10.7m διανοίγεται από TBM σε βραχομάζα μαρμαρυγιακού σχιστόλιθου ποιότητας Q=4. Η τιμή του Q_0 στη διεύθυνση διάνοιξης είναι 3. Η μονοαξονική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος είναι σ_{ci}=150MPa και ο δείκτης σημειακής φόρτισης I_{50}=4. Η δύναμη ώσης κάθε κοπτικού είναι F=25t, ο δείκτης φθοράς των κοπτικών CLI=15, το ποσοστό χαλαζία q=20%, το πορώδες n=2%, και το εντατικό πεδίο p_0=4MPa. Το μήκος της διάνοιξης είναι L=4000m.

(γ) Σήραγγα διαμέτρου 10.7m διανοίγεται από TBM σε βραχομάζα γρανίτη ποιότητας Q=22. Η τιμή του Q_0 στη διεύθυνση διάνοιξης είναι 22. Η μονοαξονική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος είναι σ_{ci}=200MPa και ο δείκτης σημειακής φόρτισης I_{50}=8. Η δύναμη ώσης κάθε κοπτικού είναι F=25t, ο δείκτης φθοράς των κοπτικών CLI=10, το ποσοστό χαλαζία q=35%, το πορώδες n=1%, και το εντατικό πεδίο p_0=6MPa. Το μήκος της διάνοιξης είναι L=4000m.

Απάντηση/Λύση

Κριτήριο αξιολόγησης 4. Υπολογισμός παραμέτρων χρονικής επίδοσης

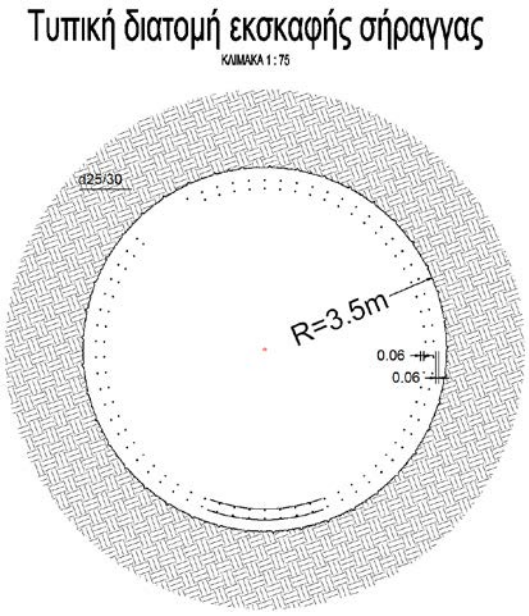
Εκτιμείστε τη διαθεσιμότητα (7-12), χρήση (7-13) και χρησιμοποίηση (7-16) TBM κατά τη διάνοιξη σήραγγας όπου μετρήθηκαν οι παρακάτω επιδόσεις:



Σχήμα 7-17. Κατανομή επιδόσεων TBM

Θέμα: Υδραυλική σήραγγα εκτροπής ποταμού

Για την εκτροπή της κοίτης ποταμού ορύσσεται υδραυλική κυκλική σήραγγα (Σχήμα 7-18) εσωτερικής πίεσης νερού συνολικού μήκους 17300m.



Σχήμα 7-18. Διατομή σήραγγας

Σύμφωνα με τη χάραξη, ορύσσεται μέσα στους ιζηματογενείς σχηματισμούς της γεωτεκτονικής ζώνης Ωλονού - Πίνδου. Στη στενότερη ζώνη επιρροής της σήραγγας η παραπάνω γεωτεκτονική ζώνη συντίθεται από το σύνολο των γεωλογικών σχηματισμών της στρωματογραφικής στήλης της εν λόγω ζώνης, πλην του κλαστικού Τριαδικού, το οποίο δεν εμφανίζεται επιφανειακά στην περιοχή χάραξης της σήραγγας.

Σύμφωνα με τα γεωλογικά και γεωτεχνικά δεδομένα που αφορούν στη ζώνη όρυξης της σήραγγας, συναντώνται συχνές εναλλαγές των επιμέρους γεωλογικών σχηματισμών, τα γεωμηχανικά χαρακτηριστικά των οποίων παρουσιάζουν σημαντική διαφοροποίηση. Επίσης, εξαιτίας της έντονης τεκτονικής καταπόνησης την οποία έχουν υποστεί κατά θέσεις τα πετρώματα, προκλήθηκαν σημαντικής έκτασης διαρρήξεις της συνέχειας της βραχομάζας (ασυνέχειες) οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα τη χειροτέρευση της ποιότητάς της. Με βάση τα παραπάνω αναμένεται ότι κατά τμήματα της σήραγγας θα συναντάται διαφορετικής ποιότητας βραχομάζα με συνακόλουθη παράλληλη διαφοροποίηση της στατικής συμπεριφοράς της και ανάλογα προβλήματα ευστάθειας, τα οποία θα πρέπει να αντιμετωπισθούν κατάλληλα με την εφαρμογή επαρκών μέτρων προσωρινής αντιστήριξης.

Για τη γεωτεχνική ταξινόμηση της ποιότητας της βραχόμαζας χρησιμοποιήθηκε το σύστημα ταξινόμησης RMR. Με βάση το σύστημα ταξινόμησης και τις τιμές που λαμβάνει ο δείκτης RMR σε κάθε περίπτωση διακρίθηκαν τα πετρώματα που αναμένεται να συναντηθούν κατά μήκος της σήραγγας σε πέντε επιμέρους κατηγορίες βραχομάζας. Οι τιμές του δείκτη RMR και ο αντίστοιχος χαρακτηρισμός της βραχομάζας δίδεται στον ακόλουθο πίνακα. Δεδομένων των κατηγοριών βραχομάζας, και των αποτελεσμάτων των εργαστηριακών δοκιμών εκτιμήθηκαν οι βασικές παράμετροι περιγραφής της ποιότητας της βραχομάζας οι οποίες δίδονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 7-2 Παράμετροι προσομοίωσης της βραχόμαζας.

Κατηγορία	**Ποιότητα βραχομάζας**	**RMR**	**E (MPa)**	**σ_{ci} (MPa)**	**m**	**s**	**m'**	**s'**
I	Πολύ καλή	85	20000	120	4,1	0,189	2,398	0,082
II	Καλή	65	10000	100	2,865	0,0205	0,821	0,00293
III	Μέτρια	44	6000	70	2,03	0,00198	0,275	0,00009
IV	Πτωχή	23	2000	20	0,639	0,00019	0,041	3×10^{-6}
V	Πολύ πτωχή	19	1800	10	0,554	0,000123	0,0307	$1,4 \times 10^{-6}$

ΖΗΤΟΥΝΤΑΙ

- Αιτιολόγηση της επιλογής κατασκευής της σήραγγας με χρήση μηχανής ολομέτωπης κοπής (TBM).
- Αιτιολόγηση, με βάση τη γεωλογική περιγραφή, της επιλογής μηχανής ανοικτού τύπου για την κατασκευή της σήραγγας.
- Γιατί η ταχύτητα προχώρησης της διάνοιξης σήραγγας είναι μεγαλύτερη όταν χρησιμοποιείται μηχανή ολομέτωπης κοπής από ότι όταν εφαρμόζεται μία συμβατική μέθοδος;
- Το TBM που επιλέχθηκε έχει τη δυνατότητα εκτέλεσης διερευνητικών γεωτρήσεων προπορείας. Τι άλλο μπορεί να εκτελεστεί μέσω αυτών των γεωτρήσεων;
- Δώστε άλλα πλεονεκτήματα της διάνοιξης με μηχάνημα ολομέτωπης κοπής.
- Πως αντιμετωπίζονται από το TBM προβλήματα αυξημένων συγκλίσεων;
- Πώς γίνεται η προχώρηση σε σκληρό πέτρωμα και πως σε μαλακό;
- Να γίνει προσομοίωση με χρήση του προγράμματος RocSupport και να εκτιμήσετε τη σύγκλιση που θα παρουσιαστεί κατά την διάνοιξη της σήραγγας πριν και μετά την εφαρμογή μέτρων υποστήριξης της επιλογής σας. Να δοθούν επιπλέον εκτυπώσεις Tunnel profile, Ground Reaction και Info Viewer
- Να υπολογιστεί ο χρόνος διάνοιξης σύμφωνα με το Q_{TBM}.

Απάντηση/Λύση

Κεφάλαιο 8

Σύνοψη
Πρόκειται για μηχανές που διατρούν πετρώματα, τα οποία κατά την εξόρυξη δεν είναι αυτοστηριζόμενα ή/και βρίσκονται υπό τον υδροφόρο ορίζοντα, και γενικά δεν επιτρέπουν ισχυρή πάκτωση στα τοιχώματα τους. Αναπτύσσονται οι τύποι των μηχανών, η λειτουργία τους, οι παράγοντες επιλογής τους, οι απαιτούμενες δυνάμεις προχώρησης, και η επίδοσή τους. Εμπέδωση επιτυγχάνεται με λυμένα παραδείγματα και ασκήσεις.

Προαπαιτούμενη γνώση
Μαθήματα: Εξόρυξη πετρωμάτων, Μηχανική των πετρωμάτων, Υποστήριξη Υπογείων Έργων. Χρήσιμη βιβλιογραφία: Maidl et al. (2012).

8. Εκμηχανισμένη διάνοιξη από ασπίδα

8.1 Εισαγωγή

Για μικρούς χρόνους ευστάθειας του περιβάλλοντος πετρώματος η μηχανή εξόρυξης συνδυάζεται με ασπίδα. Σε αυτούς τους μη ευσταθείς σχηματισμούς η ασπίδα προσφέρει ασφάλεια στους εργαζόμενους αλλά και σταθερότητα στη σήραγγα μέχρι την τοποθέτηση της επένδυσης. Η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε αρχικά σε υποβρύχιες συνθήκες μαλακού πετρώματος, κατά την κατασκευή της μήκους 360 m σήραγγας κάτω από τον Τάμεση, μεταξύ 1825÷1845 μ.Χ., από τον Brunel. Η ασπίδα είχε πλάτος 11.4 m και ύψος 6.6 m σκόπευε δε στη βελτίωση των συνθηκών ασφαλείας κατά την εκσκαφή και την τοποθέτηση της υποστήριξης. Αυτή η πρώτη υποβρύχια κατασκευή εφαρμόστηκε χωρίς τη χρήση πιεσμένου αέρα. Η κατασκευή της πρώτης κυκλικής ασπίδας το 1896, που σχεδιάσθηκε από τον Greathead, αποτελεί μεγάλο επίτευγμα στη διάνοιξη σηράγγων και χρησιμοποιήθηκε επιτυχώς κατά την κατασκευή της δεύτερης σήραγγας, μήκους 400 m και διαμέτρου 2.2 m μέσα στη στιφρή άργιλο του Λονδίνου, κάτω από τον Τάμεση, χωρίς πιεσμένο αέρα. Η ασπίδα αυτή αποτελεί τη βάση για όλες τις μετέπειτα ασπίδες.

Η βασική αρχή της ασπίδας είναι ότι μια κυλινδρική χαλύβδινη κατασκευή οδηγείται κατά μήκος του άξονα της σήραγγας, συγχρόνως με την εκσκαφή του εδάφους. Η χαλύβδινη κατασκευή στηρίζει την εκσκαφθείσα κοιλότητα μέχρι την τοποθέτηση της επένδυσης. Η ασπίδα πρέπει επομένως να αντιστέκεται στην πίεση του περιβάλλοντος εδάφους και να συγκρατεί οποιαδήποτε εισροή υπόγειων υδάτων. Ενώ η κοιλότητα κατά μήκος των παρειών της σήραγγας υποστηρίζεται από το κέλυφος της ασπίδας, πρόσθετα μέτρα μπορεί να απαιτούνται στο μέτωπο για την υποστήριξή του και τη συγκράτηση των υπόγειων υδάτων. Διακρίνονται πέντε διαφορετικές μέθοδοι στήριξης του μετώπου:

- Φυσική στήριξη,
- Μηχανική στήριξη,
- Στήριξη πιεσμένου αέρα,
- Στήριξη πολφού υπό πίεση,
- Στήριξη αντιστάθμισης με λάσπη υπό πίεση.

Η απομάκρυνση του υλικού εκσκαφής απαιτεί ειδικά συστήματα μεταφοράς των μπαζών από το μέτωπο, μέσα από την ασπίδα και προς την επίγεια επιφάνεια. Η καταλληλότητα του συστήματος εξαρτάται από τη φύση του εδάφους που εκσκάπτεται και το είδος της υποστήριξης του μετώπου. Σήμερα υπάρχουν πολυάριθμες μέθοδοι μεταφοράς που είναι διαθέσιμες, οι οποίες μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις βασικές ομάδες:

- Ξηρή μεταφορά,
- Μεταφορά Υγρή/πολφού,
- Άντληση υψηλής πυκνότητας στερεών.

Η μεταφορά κατά μήκος της σήραγγας μπορεί να χρησιμοποιήσει σωλήνες άντλησης, ιμάντες μεταφοράς, ανατρεπόμενα φορτηγά, ή σιδηροδρομικά συστήματα, ενσωματωμένα στο συρμό εξυπηρέτησης ως τα σημεία ανέλκυσης ή εξόδου. Εκεί αδειάζουν, για να μεταφερθούν με φορτηγά αυτοκίνητα στα σημεία εναπόθεσης.

Η διάνοιξη σήραγγας από ασπίδα μπορεί, να προσφέρει μια τεχνικά εφικτή αλλά και οικονομική εναλλακτική λύση, σε σχέση με άλλες μεθόδους διάνοιξης σηράγγων, εκεί όπου: οι γεωλογικές συνθήκες είναι δυσμενείς, τα μήκη της σύμβασης μεγάλα, οι απαιτούμενοι ρυθμοί διάνοιξης υψηλοί, και οι επιτρεπόμενες επιφανειακές καθιζήσεις πολύ μικρές. Τα ουσιώδη πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα συνοψίζονται παρακάτω.

Πλεονεκτήματα:

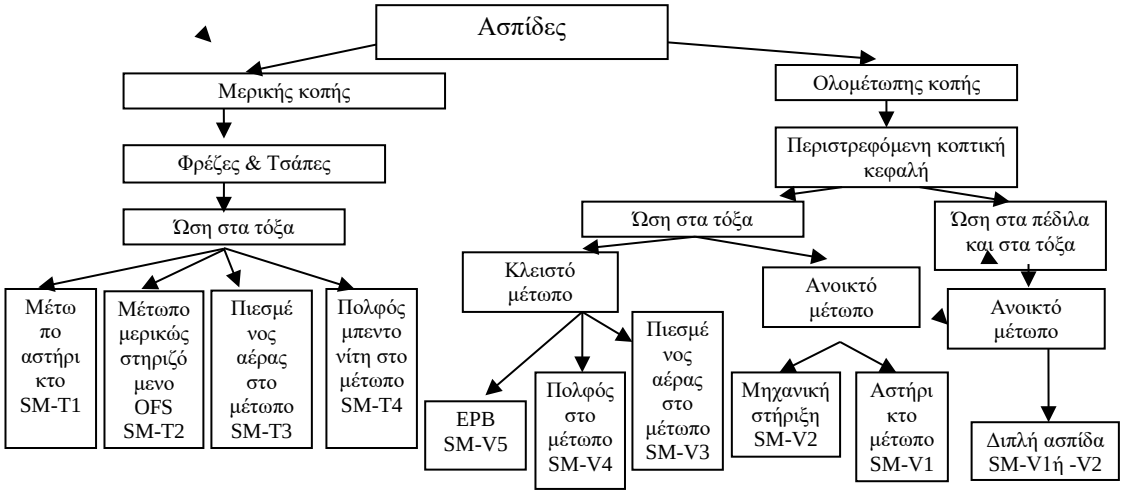
- Κατασκευή σήραγγας σ' ένα βήμα και σε όλη τη διάσταση της διατομής,
- Σταθερή υποστήριξη στην προχωρούσα διάνοιξη με τη μορφή κινούμενου συστήματος,
- Τοποθέτηση άμεσης μόνιμης υποστήριξης,
- Ελάχιστη δυνατή χαλάρωση της γεωμάζας,
- Δυνατότητα εκμηχάνισης και υψηλός ρυθμός προχώρησης,
- Ακρίβεια της διατομής εκσκαφής,
- Ελαχιστοποίηση της επίδρασης στα κτίρια στην επιφάνεια,
- Βελτίωση της ασφάλειας για τους εργαζόμενους,
- Φιλική προς το περιβάλλον μέθοδος κατασκευής,
- Παραμονή του υδροφόρου ορίζοντα στη θέση του,
- Λίγος θόρυβος,
- Υψηλής ποιότητας και οικονομική επένδυση της σήραγγας

Μειονεκτήματα:

- Μεγάλο χρονικό διάστημα για το σχεδιασμό, την κατασκευή, και τη συναρμολόγηση της ασπίδας,
- Μεγάλο χρονικό διάστημα εξοικείωσης,
- Περίπλοκες και ακριβές εγκαταστάσεις εργοταξίου,
- Ανταγωνιστική μόνο για σήραγγες μεγάλου μήκους,
- Διακινδύνευση της επίδοσης σε ευμετάβλητο έδαφος,
- Διατομή γενικά κυκλική,
- Υψηλό κόστος αλλαγής της γεωμετρίας της εκσκαφής, π.χ. για διευρυμένα τμήματα,
- Επένδυση ειδικά σχεδιασμένη ώστε να αντέχει στις δυνάμεις ώσης.

Εφαρμογή είναι εφικτή όταν τα πλεονεκτήματα μπορούν να αξιοποιηθούν και τα μειονεκτήματα να αντιμετωπιστούν επιτυχώς στο σχεδιασμό.

Οι ασπίδες διακρίνονται σύμφωνα με τη διαδικασία κοπής, τον τρόπο στήριξης του μετώπου και το σχήμα της διατομής. Σύμφωνα με τη διαδικασία κοπής διακρίνονται σε μερικής και σε ολομέτωπης κοπής. Σύμφωνα με τον τρόπο στήριξης (ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-12-02-01-02:2009) του μετώπου (βλ. 7.1.3) διακρίνονται σε ανοικτού και κλειστού (υπό πίεση) μετώπου. Σύμφωνα με τη μορφή της διατομής της σήραγγας διακρίνονται σε κυκλικής ή μη κυκλικής διατομής. Οι ασπίδες για χαλαρούς σχηματισμούς, στις γερμανικές οδηγίες της DAUB (1997), διακρίνονται στις κατηγορίες που απεικονίζονται στο Σχήμα 8-1.

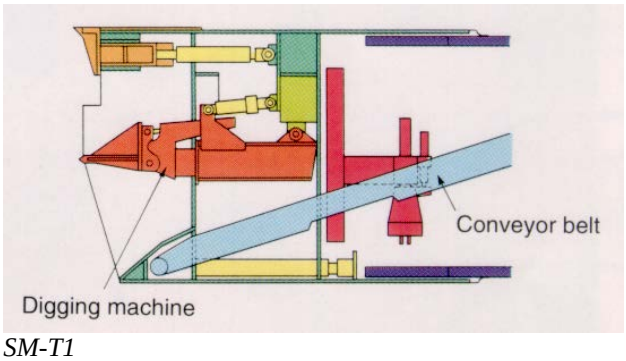


Σχήμα 8-1. Κατηγορίες ασπίδων σύμφωνα με τις οδηγίες της DAUB (1997)

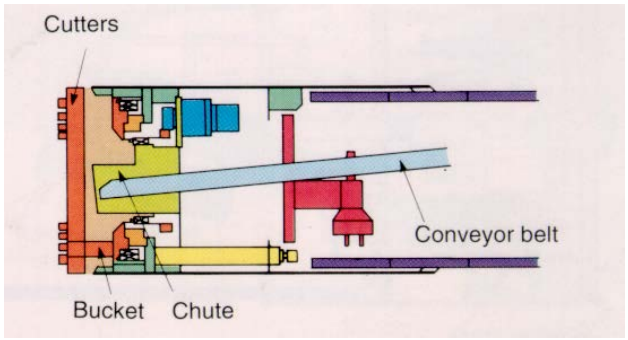
Σε σκληρούς σχηματισμούς χρησιμοποιούνται επίσης μηχανές με ασπίδα (βλ. Σχήμα 7.3). Στην περίπτωση που το μέτωπο είναι ανοικτό, αντί των μηχανών SM-V1 ή SM-V2 χρησιμοποιούνται TBM-S. Όταν απαιτείται κλειστό μέτωπο αντί των SM-V3, SM-V4, SM-V5, χρησιμοποιούνται TBM-S3, TBM-S4, TBM-S5, αντίστοιχα.

8.2 Ασπίδες ανοικτού μετώπου

Εφόσον το μέτωπο της σήραγγας είναι ευσταθές και δεν υπάρχουν εισρέοντα νερά από το μέτωπο, για τη διάνοιξη αρκεί η επιλογή μιας ασπίδας ανοικτού μετώπου τύπου TBM-S, SM-V1 ή -T1 (Σχήμα 8-2). Σε ορισμένες περιπτώσεις απαιτείται υποβοηθητική στήριξη του μετώπου. Η στήριξη αυτή επιτυγχάνεται συνήθως μηχανικά από ασπίδες τύπου SM-V2 ή -T2, με την αντιστήριξη που προσφέρουν είτε η κοπτική κεφαλή με την ώση της και τη ρύθμιση των ανοιγμάτων στην κεφαλή, είτε ειδικά διαμορφωμένες πλάκες, αντίστοιχα. Πρόκειται για τυπικές μηχανές πετρωμάτων, τα οποία έχουν μικρότερους χρόνους ευστάθειας, και χρησιμοποιούνται όταν είναι απαραίτητη πολύ σύντομα η υποστήριξη της σήραγγας με επένδυση από προκατασκευασμένα τόξα (segments). Σε αυτούς τους μη ευσταθείς σχηματισμούς η ασπίδα προσφέρει ασφάλεια στους εργαζόμενους αλλά και σταθερότητα στη σήραγγα μέχρι την τοποθέτηση της επένδυσης.



SM-T1



SM-V1

Σχήμα 8-2. Διάκριση ασπίδων. Επάνω: Ασπίδες ανοικτού τύπου μερικής ή ολομέτωπης εκσκαφής.

Στις μηχανές αυτές η ασπίδα, ένα χαλύβδινο κυλινδρικό κέλυφος με διάμετρο κατά τι μικρότερη της διαμέτρου D της εκσκαφής, προστατεύει τον εκσκαμμένο χώρο μέχρις εκεί που τοποθετείται η στήριξη της σήραγγας. Επομένως, πρέπει να δύναται να φέρει την πίεση του περιβάλλοντος πετρώματος, και να παρεμποδίζει την είσοδο του εδάφους. Η ασπίδα, συγχρόνως με την εκσκαφή του μετώπου, προωθείται κατά τον άξονα της σήραγγας προκειμένου να παρέχει συνεχή προστασία στο χώρο της εκσκαφής.

8.2.1 Ασπίδα δίχως στήριξη μετώπου

8.2.1.1 Ολομέτωπη κοπή (TBM-S, SM-V1)

Οι μηχανές αυτές είναι εξοπλισμένες με μια προστατευτική ασπίδα αμέσως πίσω από το σύστημα κοπής,. Το Μηχάνημα ολομέτωπης κοπής χωρίς μηχανική υποστήριξη «SM-V1», χρησιμοποιείται κυρίως σε στερεά και σταθερά αργιλικά εδάφη. Προκειμένου να διασφαλιστεί ότι σε σήραγγες με χαμηλό υπερκείμενο δεν θα σημειωθούν καθιζήσεις στην επιφάνεια, η αντοχή του υλικού εκσκαφής σε θλίψη δεν θα πρέπει να είναι μικρότερη από 100 kPa περίπου και η συνοχή θα πρέπει να κυμαίνεται στην τιμή των 30 kPa.

Η μηχανή κινείται προς τα εμπρός ωθώντας επάνω στον τελευταίο προκατασκευασμένο δακτύλιο επένδυσης της σήραγγας με την χρήση των υδραυλικών εμβόλων ώθησης. Η τοποθέτηση ενός νέου δακτυλίου επένδυσης επιβάλλει, γενικά, τη διακοπή της κοπής του πετρώματος, με αποτέλεσμα την καθυστέρηση της διάνοιξης. Ο κύκλος εργασιών περιλαμβάνει: (1) εκσκαφή μήκους ίσου με το μήκος της διαδρομής των εμβόλων ώθησης, (2) οπισθοχώρηση των εμβόλων και συναρμολόγηση της επένδυσης από προκατασκευασμένα τόξα σκυροδέματος και (3) νέα ώση και εκσκαφή. Τα κύρια συστατικά της μηχανής είναι:

- Περιστρεφόμενη κοπτική κεφαλή, εξοπλισμένη με κοπτικές λεπίδες ή δόντια, συνήθως και με κοπτικούς δίσκους, και το αρχικό σύστημα αποκόμισης των μπαζών.
- Προστατευτική ασπίδα, που περιέχει όλα τα κύρια συστατικά της μηχανής, η οποία είναι κυλινδρική ή ελαφρώς κωνική. Η ασπίδα μπορεί να είναι μονολιθική ή αρθρωτή αποτελούμενη από δύο ή τρία τμήματα ώστε να διευκολύνεται η διαμόρφωση των καμπύλων χαράξεων.
- Σύστημα ώσης που αποτελείται από ένα σύνολο διαμηκών υδραυλικών εμβόλων που βρίσκονται στο εσωτερικό της ασπίδας, που ωθούνται στην επένδυση της σήραγγας.



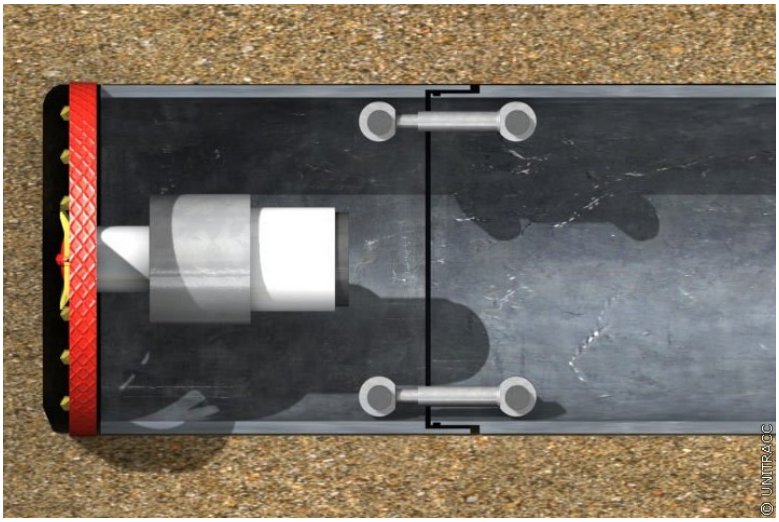
Σχήμα 8-3. Αριστερά: Μηχανή TBM-S μονής ασπίδας. Δεξιά: Προκατασκευασμένα τόξα δακτυλίου επένδυσης σήραγγας

Η ασπίδα διακρίνεται κατά μήκος σε πρόσθιο τμήμα, σώμα και ουρά. Στο πρόσθιο τμήμα της ασπίδας βρίσκεται η περιστρεφόμενη κεφαλή ολομέτωπης κοπής που δύναται να είναι μορφής τύμπανου ή με ακτινωτούς τροχούς. Στο τύμπανο ή στους ακτινωτούς τροχούς είναι τοποθετημένα δόντια ή/και δίσκοι για την κοπή του πετρώματος (Σχήμα 8-3, αριστερά). Τα μπάζα εξάγονται από ρυθμιζόμενα ανοίγματα ή κάδους και χύνονται στο πρώτο σύστημα αποκομιδής. Στην περίπτωση του μετρό της Αθήνας, η κεφαλή αποτελείτο από 8 τόξα εξοπλισμένα με οδόντες και μονούς δίσκους κοπής, που περιστρέφονταν με ταχύτητα μέχρι 4 στροφών το λεπτό. Σε ορισμένους τύπους μηχανών η ολομέτωπη εκσκαφή επιτυγχάνεται υδραυλικά με εκτόξευση υγρού υπό πίεση. Οι απαιτούμενες δυνάμεις ώσης παρέχονται από υδραυλικές πρέσες. Η ήδη τοποθετημένη στήριξη της σήραγγας χρησιμεύει ως βάση ώθησης. Προς τούτο, πρέπει να υπάρχει συντονισμός της τοποθέτησης της στήριξης και της προώθησης της ασπίδας.

Πίσω από την κεφαλή βρίσκεται το κύριο σώμα της ασπίδας, στο οποίο βρίσκονται οι κινητήρες, το σύστημα αποκόμισης των μπαζών και το πιλοτήριο. Η αποκόμιση του εκσκαμμένου υλικού επιτυγχάνεται με ειδικά συστήματα που το μεταφέρουν στην επιφάνεια. Τα συστήματα αυτά εξαρτώνται από το είδος του πετρώματος εκσκαφής, καθόσον η συνεκτικότητά του επηρεάζει τη δυνατότητα μεταφοράς. Οι δυνατότητες μεταφοράς διακρίνονται βασικά σε δύο κατηγορίες, ήτοι σε ξηρή και υγρή μεταφορά. Για μικρής διαμέτρου σήραγγες μεγάλου μήκους η υδραυλική αποκόμιση παρουσιάζει πλεονεκτήματα.

Πίσω από το κύριο σώμα βρίσκεται η ουρά της ασπίδας όπου είναι εγκατεστημένα, το σύστημα ανάρτησης και τοποθέτησης της επένδυσης και τα έμβολα ώσης. Η επένδυση για τη στήριξη του πετρώματος τοποθετείται μέσα από την ουρά της ασπίδας, και γενικά αποτελείται από προκατασκευασμένα τόξα (segments) οπλισμένου σκυροδέματος (Σχήμα 8-3, δεξιά). Τα στοιχεία αυτά περιβάλλονται με ελαστομερές υλικό για τη στεγάνωση των αρμών τους και συνδέονται συχνά με ειδικούς κοχλίες. Μετά την προχώρηση της ασπίδας, παραμένει δακτυλιοειδές διάκενο μεταξύ επένδυσης και εσωραχείου του περιβάλλοντος πετρώματος που πρέπει να πληρωθεί, προκειμένου να αποφευχθεί η χαλάρωση του πετρώματος ή/και να ελαχιστοποιηθούν οι καθιζήσεις. Γι' αυτό, ο συρμός εξυπηρέτησης πρέπει να είναι εξοπλισμένος με σύστημα εισπίεσης ενέματος στο δακτυλιοειδές διάκενο.

Κύριο πεδίο εφαρμογής είναι πετρώματα των οποίων η ποιότητα κυμαίνεται από "καλή" έως "πτωχή", αυτοϋποστήρικτα σε γενικές γραμμές ασθενή πετρώματα ή συνεκτικές έως μερικά συνεκτικές γεωμάζες, απουσία υπόγειων υδάτων.



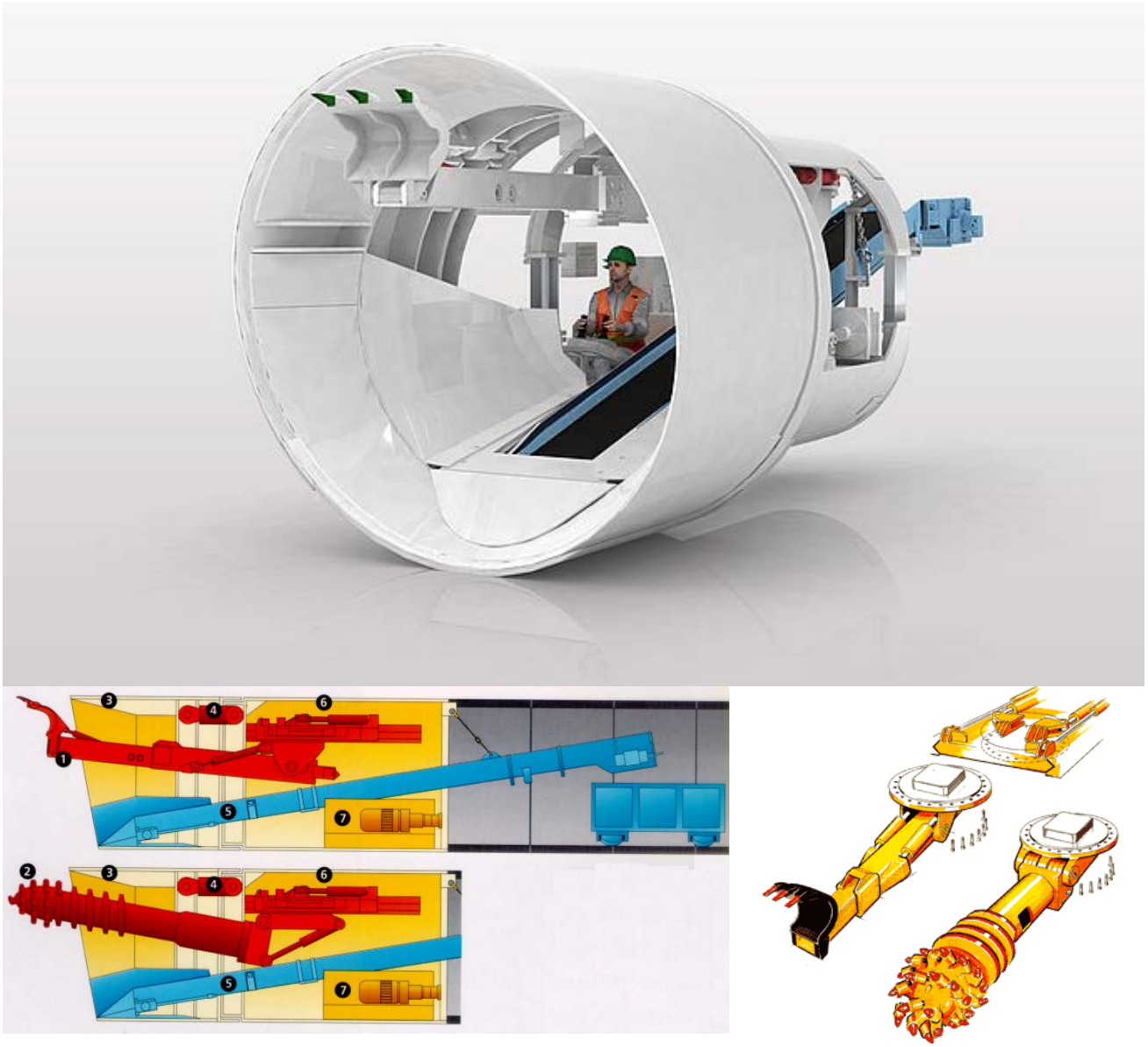
Σχήμα 8-4. Μηχανή ολομέτωπης κοπής SM-V1 - Herrenknecht

8.2.1.2 Μερική κοπή (SM-T1)

Διακρίνονται σε τυφλές, χειρωνακτικής κοπής και ημιεκμηχανισμένες. Η τυφλή ασπίδα έχει στην κεφαλή της κατακόρυφο διάφραγμα με κεντρική οπή ρυθμιζόμενου ανοίγματος. Με την ώθηση της ασπίδας και του διαφράγματος προς το μέτωπο, το μαλακό έδαφος εκβάλλεται, μέσα από την κεντρική οπή, εντός της τυφλής ασπίδας από όπου και απομακρύνεται. Οι τυφλές ασπίδες υπήρξαν ο προάγγελος των μετέπειτα εκμηχανισμένων ασπίδων EPBM. Χειρωνακτικές ασπίδες ήταν οι πρώτες ασπίδες όπως των Brunel και Greathead κάτω από τον Τάμεση. Τόσον οι τυφλές όσον και οι χειρωνακτικές ασπίδες δεν βρίσκουν εφαρμογή σήμερα, παρά μόνο σε πολύ μικρού μεγέθους έργα.

Αντίθετα, ασπίδες μερικής κοπής (SM-T1) βρίσκουν πολλές εφαρμογές, καθόσον είναι αποτελεσματικές σε πολλές περιπτώσεις, στις οποίες το κόστος αντίστοιχα κατάλληλων πλήρως εκμηχανισμένων είναι σημαντικά μεγαλύτερο. Η εκσκαφή πραγματοποιείται από βραχίονες με σκαπτικά άκρα τύπου τσάπας ή φρέζας (*Σχήμα 8-7*), τα οποία επιλέγονται ώστε να είναι κατάλληλα για την κοπή του εδάφους. Το ανοικτό μέτωπο επιτρέπει την πλήρη εποπτεία του για την εφαρμογή των απαραίτητων μέτρων. Το σχήμα της διατομής διάνοιξης συνήθως είναι κυκλικό, χωρίς όμως αυτό να είναι υποχρεωτικό.

Τα προϊόντα της εκσκαφής απομακρύνονται με μηχανικά μέσα και οδηγούνται στην χοάνη του μεταφορικού κοχλία μέσω των τηλεσκοπικών κάδων. Οι κάδοι προσαρτώνται στην κάθε πλευρά της κεφαλής σημειακής κοπής. Ο ατέρμονας μεταφορικός κοχλίας στερεώνεται στην εμπρόσθια και οπίσθια ασπίδα και μεταφέρει τα προϊόντα της εκσκαφής από το μέτωπο της κεφαλής κοπής στο μεταφορικό ιμάντα. Το βασικό μειονέκτημα του μηχανήματος μερικής εκσκαφής μετώπου είναι ο κίνδυνος μεγάλων καθιζήσεων λόγω της μερικώς μόνο ελεγχόμενης στήριξης του μετώπου.



Σχήμα 8-5. Πάνω: Μηχανή μερικής κοπής με ασπίδα SM-T1- Herrenknecht. Κάτω: Εκσκαπτικό και φρέζα ασπίδας – (1) βραχίονας εκσκαφέα, (2) φρέζα, (3) ασπίδα, (4) έμβολο οδήγησης, (5) μεταφορικός ιμάντας

8.2.2 Ασπίδα με στήριξη μετώπου

8.2.2.1 Ολομέτωπη κοπή (SM-V2)

Στις ασπίδες αυτές η κοπτική κεφαλή παίζει το διπλό ρόλο, αφενός της κοπής, και αφετέρου της υποστήριξης του μετώπου της σήραγγας με τη χρήση κινητών πλακών ωθούμενων από ειδικά υδραυλικά έμβολα (Σχήμα 8-6), στο έδαφος. Η κοπτική κεφαλή είναι εξοπλισμένη με δίσκους κοπής, ενώ τα προϊόντα εκσκαφής, απομακρύνονται μέσω των μεταφορικών ιμάντων. Η συνεκτικότητα των εδαφών στα οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί κυμαίνεται μεταξύ 5 και 30 kPa. Τα υλικά εκσκαφής περνούν μέσα στον θάλαμο της κοπτικής κεφαλής μέσω ανοιγμάτων (περίπου το 30 έως 35% της επιφάνειας της κοπτικής κεφαλής είναι ανοικτό στο έδαφος) και στην συνέχεια συγκεντρώνονται από τους σιαγώνες εκχωμάτωσης και ανυψώνονται στο άνω τμήμα του θαλάμου της κεφαλής κοπής και πέφτουν στη χοάνη. Η χοάνη της κεφαλής κοπής αδειάζει τα προϊόντα εκσκαφής στην μεταφορική ταινία που συνεχίζεται στο συρμό εξυπηρέτησης στο επίπεδο του άξονα της σήραγγας.



Σχήμα 8-6. Μηχανή ολομέτωπης κοπής μηχανικής στήριξης του μετώπου SM-V2, Μετρό της Αθήνας – NFM - Mitsubishi

8.2.2.2 Μερική κοπή (SM-T2)

Η ασπίδα Ανοικτού Μετώπου (OFS) προσφέρει επιπλέον μερική στήριξη του άνω τμήματος του μετώπου (Σχήμα 8-7). Εφαρμόζεται σε μαλακό πέτρωμα ή εδαφικό σχηματισμό, στα οποία το μέτωπο της εκσκαφής είναι σταθερό. Αποτελείται από δύο κύρια τμήματα, την εμπρόσθια και την οπίσθια ασπίδα. Η εμπρόσθια ασπίδα περιλαμβάνει τα πτερύγια θωράκισης προπορείας σε τόξο 180° στο άνω τμήμα του κοπτικού άκρου του πρόσθιου τμήματος του OFS, τον τηλεσκοπικό βραχίονα κεφαλής σημειακή κοπής, τους τηλεσκοπικούς κάδους φόρτωσης, τα διατρητικά, τα έμβολα μετώπου, την καμπίνα χειρισμών και τον ατέρμονα μεταφορικό κοχλία. Η οπίσθια ασπίδα και το ουραίο περίβλημα περιλαμβάνει την διάταξη τοποθέτησης στοιχείων επένδυσης, τα σημεία έγχυσης ενέματος, τις συρματόβουρτσες του ουραίου περιβλήματος και τον εξοπλισμό άντλησης υδάτων.



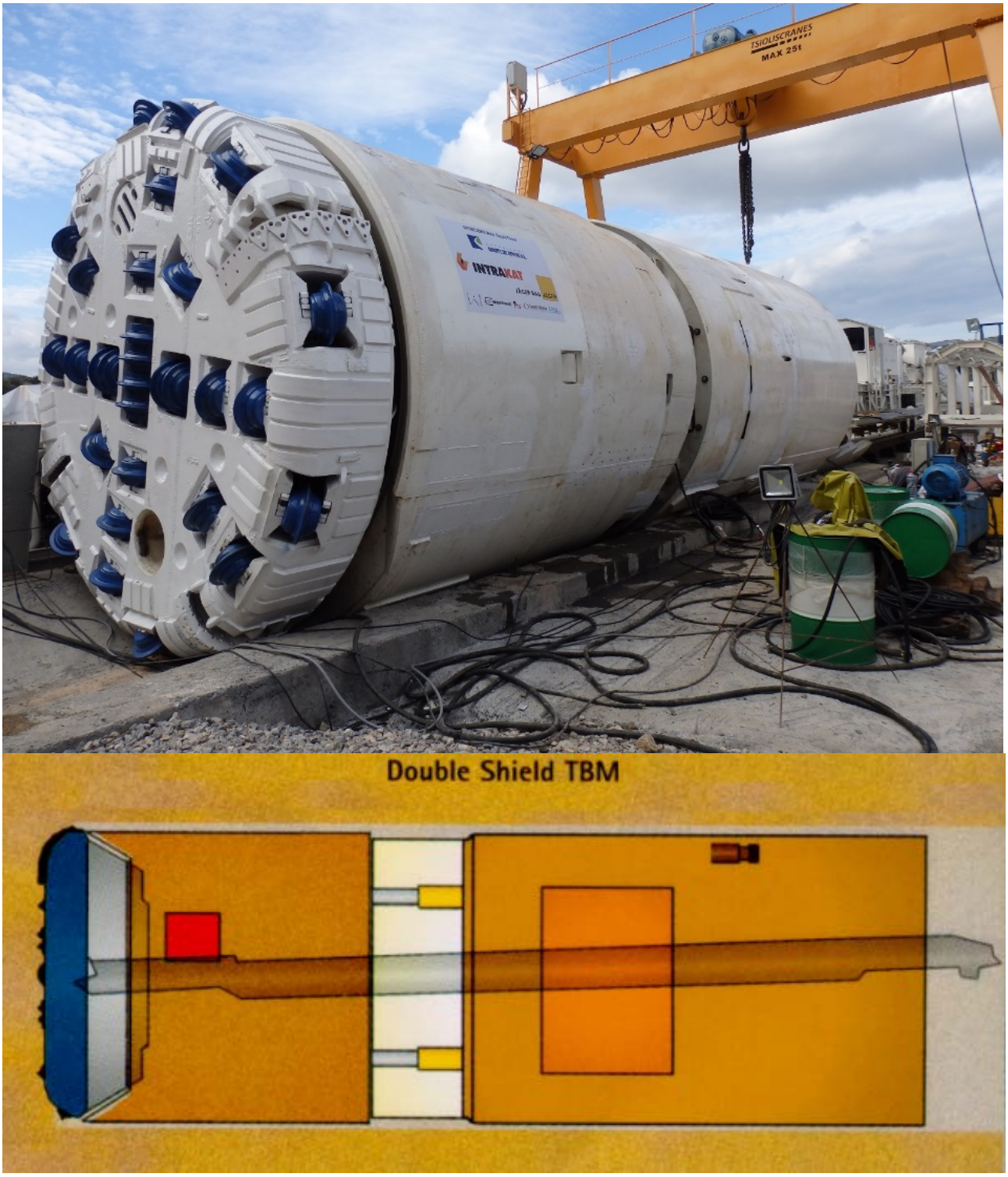


Σχήμα 8-7. Ασπίδες SM-T2. Αριστερά: Με βραχίονα εκσκαφέα. Δεξιά: OFS διαμέτρου 9495mm με φρέζα 300kW που χρησιμοποιήθηκε για τη διάνοιξη 1911m της γραμμής 2 του μετρό της Αθήνας.

8.2.3 Διπλή ασπίδα (DSM)

Το κύριο πεδίο εφαρμογής της είναι η βραχομάζα, τα χαρακτηριστικά της οποία κυμαίνονται από μαλακό έδαφος έως κακής ποιότητας βράχου. Το σώμα της ασπίδας αυτής αποτελείται από δύο επιμέρους κελύφη ασπίδας που ενώνονται τηλεσκοπικά (*Σχήμα 8-8*). Είναι μηχανή ολομέτωπης κοπής με δύο ομάδες εμβόλων ώθησης που επενεργούν είτε ακτινικά στα τοιχώματα της σήραγγας ή στα προκατασκευασμένα στοιχεία επένδυσης της σήραγγας. Τα προκατασκευασμένα στοιχεία που χρησιμοποιούνται εξαρτώνται από τον τύπο εδάφους που συναντάται. Χρησιμοποιείται προκειμένου να μειωθούν οι χρόνοι αναμονής για την τοποθέτηση της επένδυσης. καθόσον η τοποθέτηση της επένδυσης με προκατασκευασμένα στοιχεία μπορεί να γίνει ταυτόχρονα με την προχώρηση. Τα έμβολα της κοπτικής κεφαλής, τα οποία βρίσκονται μεταξύ της πρόσθιας και της οπίσθιας ασπίδας, προεκτείνονται ώστε να ωθήσουν προς τα εμπρός την κοπτική κεφαλή, ενώ συγχρόνως πραγματοποιείται η εγκατάσταση της επένδυσης με προκατασκευασμένα στοιχεία.

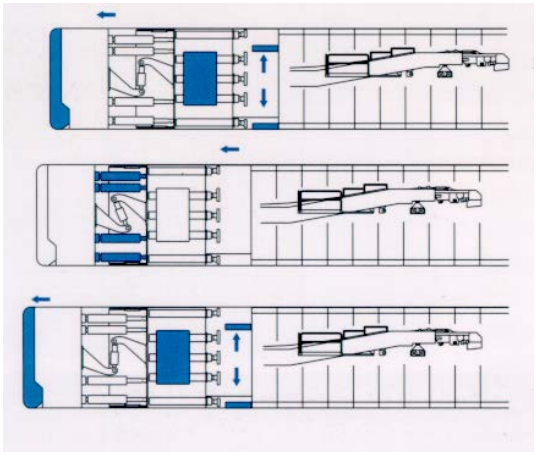
Η Μηχανή Διπλής Ασπίδας ολομέτωπης κοπής (Double shield) – SM-D, λειτουργεί με «ανοικτό μέτωπο διάτρησης». Εφαρμόζεται σε σκληρά πετρώματα και σε σταθεροποιημένα εδάφη. Η μηχανή περιλαμβάνει δύο ομάδες εμβόλων ώθησης που επενεργούν είτε ακτινικά στα τοιχώματα της σήραγγας, τα πέδιλα αντιστήριξης (grippers), είτε στα προκατασκευασμένα στοιχεία της μόνιμης επένδυσης της σήραγγας.
Η μηχανή διπλής ασπίδας που φαίνεται στο Σχήμα 8-8, έχει το πλεονέκτημα του ότι η τοποθέτηση της μόνιμης επένδυσης μπορεί να γίνει ταυτόχρονα, κατά την διάρκεια της διαδικασίας εκσκαφής και προχώρησης της μηχανής.



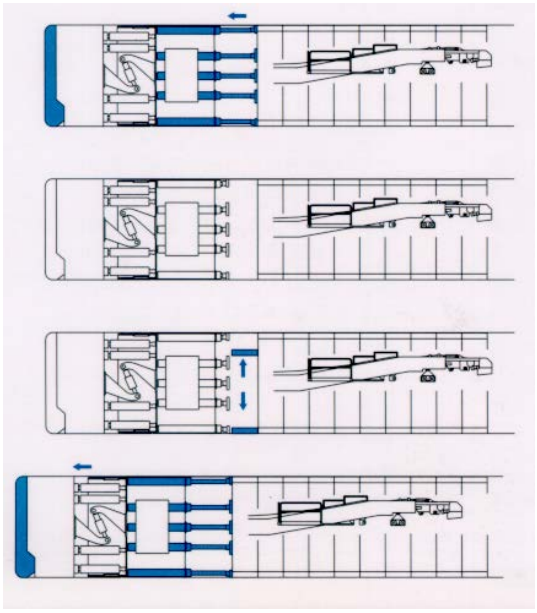
Σχήμα 8-8. Μηχανή διπλής ασπίδας. Άνω: Μηχανή διπλής ασπίδας διαμέτρου 4,930m – Φράγμα Αποσελέμη Κρήτη. Κάτω: Σκαρίφημα μηχανής.

Η οπίσθια ασπίδα είναι εξοπλισμένη με πέδιλα αντιστήριξης και με έμβολα ώσης. Όταν το πέτρωμα είναι επαρκούς αντοχής, η οπίσθια ασπίδα στηρίζεται στο πέτρωμα με τα πέδιλα και η πρόσθια ασπίδα προωθείται τηλεσκοπικά ωθώντας τα έμβολα στην οπίσθια ασπίδα (*Σχήμα 8-9α*). Η επένδυση τοποθετείται συγχρόνως μέσα από την ακίνητη οπίσθια ασπίδα. Ο κύκλος διάνοιξης επομένως είναι: α) Έκταση των πεδίλων στήριξης και κοπή με προχώρηση της πρόσθιας ασπίδας και τοποθέτηση της επένδυσης στην οπίσθια, β) Σταμάτημα της κοπής, μάζεμα των πέδιλων και προχώρηση της οπίσθιας ασπίδας, γ) Επανάληψη της διαδικασίας. Ο κύκλος αυτός είναι αντίστοιχος με αυτόν των μηχανών με πέδιλα και επιτυγχάνει αντίστοιχους

γρήγορους χρόνους. Στην περίπτωση που το πέτρωμα δεν έχει επαρκή αντοχή για στήριξη των πέδιλων, η ασπίδα λειτουργεί ως μονή με ώθηση των εμβόλων στην ήδη τοποθετημένη επένδυση (*Σχήμα 8-9*β).. Ο κύκλος διάνοιξης επομένως είναι: α) κοπή-ώση, β) οπισθοχώρηση των εμβόλων, γ) τοποθέτηση της επένδυσης, δ) κοπή-ώση ξανά.

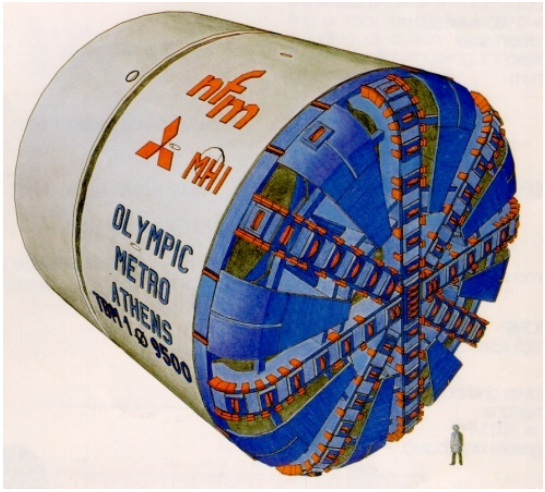


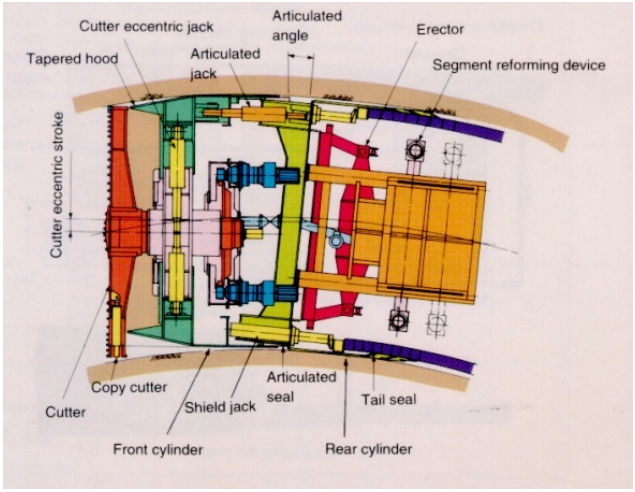
(α) Προχώρηση χρησιμοποιώντας τα πέδιλα



(β) Προχώρηση με μόνο το μηχανισμό των εμβόλων ώσης

Σχήμα 8-9. Προχώρηση διπλής ασπίδας





Σχήμα 8-10. Αριστερά: Αρθρωτή διπλή μηχανική (ανοικτού τύπου) ασπίδα ολομέτωπης διάνοιξης των γραμμών 2 και 3 του Μετρό της Αθήνας – Διάμετρος 9516mm, Μήκος 8965mm, Βάρος 900t. Δεξιά: Μηχανισμός ασπίδας με άρθρωση

Τα κύρια συστατικά της είναι:

- Περιστρεφόμενη κοπτική κεφαλή, εξοπλισμένη με κοπτικούς δίσκους, και πρώτο σύστημα αποκομιδής μπαζών.
- Προστατευτική ασπίδα η οποία είναι είτε κυλινδρική ή ελαφρώς κωνική.
- Διπλό σύστημα προώθησης που συνήθως αποτελείται από ένα σύνολο διαμηκών εμβόλων, και ένα σύνολο πέδιλων πάκτωσης στα τοιχώματα της σήραγγας προκειμένου να αντιστηρίζει την ώθηση των εμβόλων.

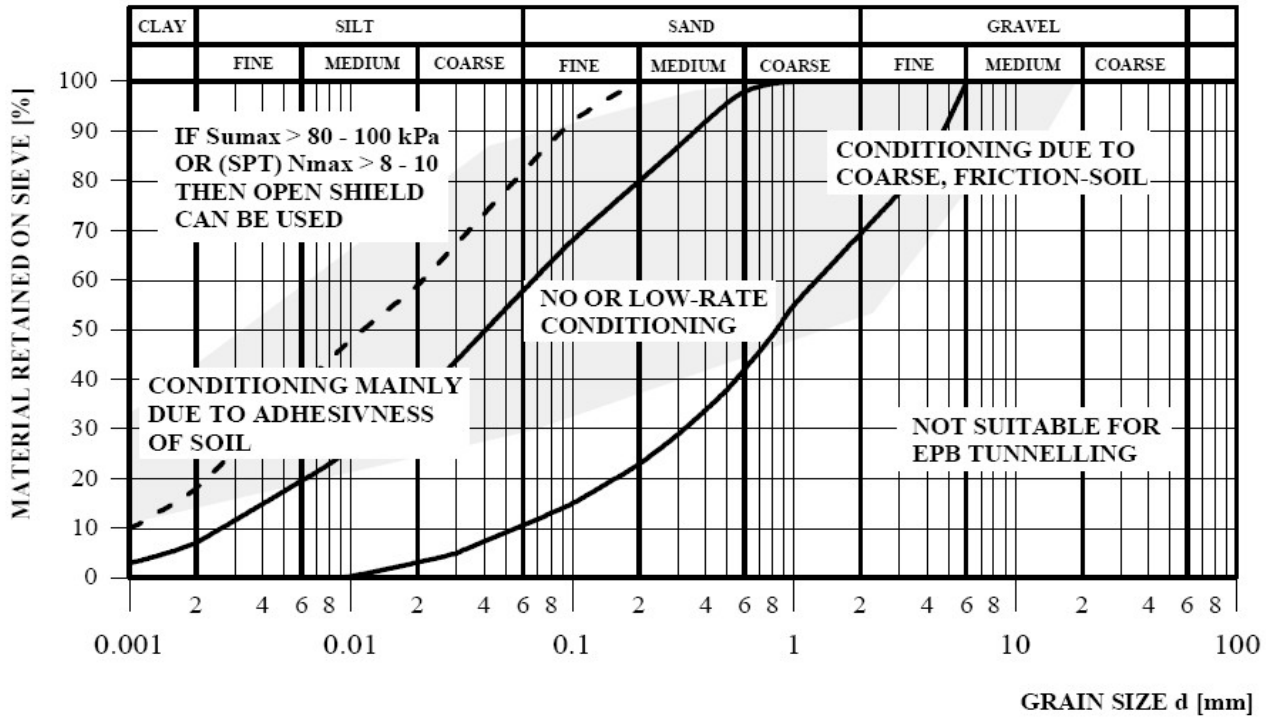
Η καμπυλότητα της χάραξης εξαναγκάζει την ασπίδα να διανοίγει μεγαλύτερη διατομή σήραγγας από την απαιτούμενη. Τούτο εξαρτάται από το μήκος της ασπίδας, το οποίο ειδικά στις διπλές ασπίδες είναι σημαντικό. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η υπερεκσκαφή αυτή κατά τη διάνοιξη σηράγγων καμπύλης τροχιάς, οι ασπίδες εφοδιάζονται με αρθρώσεις (Σχήμα 8-10), εκ των οποίων μία άρθρωση περίπου στο μέσον

τους, επιτρέπει τη στροφή της ασπίδας. Μία δεύτερη άρθρωση τοποθετείται μεταξύ κοπτικής κεφαλής και σώματος. Η πρώτη επιτρέπει μία σχετική γωνία στροφής 6ο - 9ο και η δεύτερη 2ο - 3ο. Η ρύθμισή τους επιτυγχάνεται με ηλεκτρική κίνηση και υδραυλικό σύστημα.

Κύριο πεδίο εφαρμογής της είναι ομοιογενή πετρώματα των οποίων η ποιότητα κυμαίνεται από "πολύ καλή" έως "πτωχή".

8.3 Ασπίδες κλειστού μετώπου

Η μηχανική στήριξη του μετώπου, εν τούτοις, δεν είναι πάντα επαρκής, ιδιαίτερα όταν η ασπίδα πραγματοποιεί διάνοιξη υπό τον υδροφόρο ορίζοντα. Επίσης, η ανεξέλεγκτη κοπή υλικού είναι αιτία καθιζήσεων σε αστικές αβαθείς σήραγγες. Εφόσον επομένως το μέτωπο της σήραγγας είναι ασταθές, και για την ευστάθεια του μετώπου δεν αρκεί η πίεση στη γεωμάζα που ασκείται απευθείας από την κοπτική κεφαλή, ή υπάρχουν εισρέοντα νερά, τότε απαιτείται ασπίδα κλειστού μετώπου. Στις ασπίδες αυτές ο χώρος της κεφαλής βρίσκεται υπό πίεση και είναι απομονωμένος από την υπόλοιπη ασπίδα με στεγανό διάφραγμα. Στον κλειστό αυτό χώρο βρίσκεται υπό πίεση είτε αέρας είτε πολφός αιωρήματος μπεντονίτη είτε λάσπη εδάφους. Ανάλογα με τον τρόπο που ασκείται η πίεση στο μέτωπο, οι ασπίδες αυτές διακρίνονται σε τρεις κύριες κατηγορίες. Η επιλογή του κατάλληλου μηχανήματος εξαρτάται κυρίως από τον τύπο της γεωμάζας που θα εκσκαφτεί. Το Σχήμα 8-11 δίνει οδηγίες επιλογής κάποιων τύπων μηχανών της εταιρείας, με βάση την κατηγορία του εδάφους και την κοκκομετρική διαβάθμισή του.



Σχήμα 8-11. Καταλληλότητα ασπίδας σύμφωνα με την κοκκομετρική διαβάθμιση του εδάφους

8.3.1 Ασπίδες στήριξης με πιεσμένο αέρα *(ή Τ3)*

8.3.1.1 Ολομέτωπη κοπή *(SM-V3)*

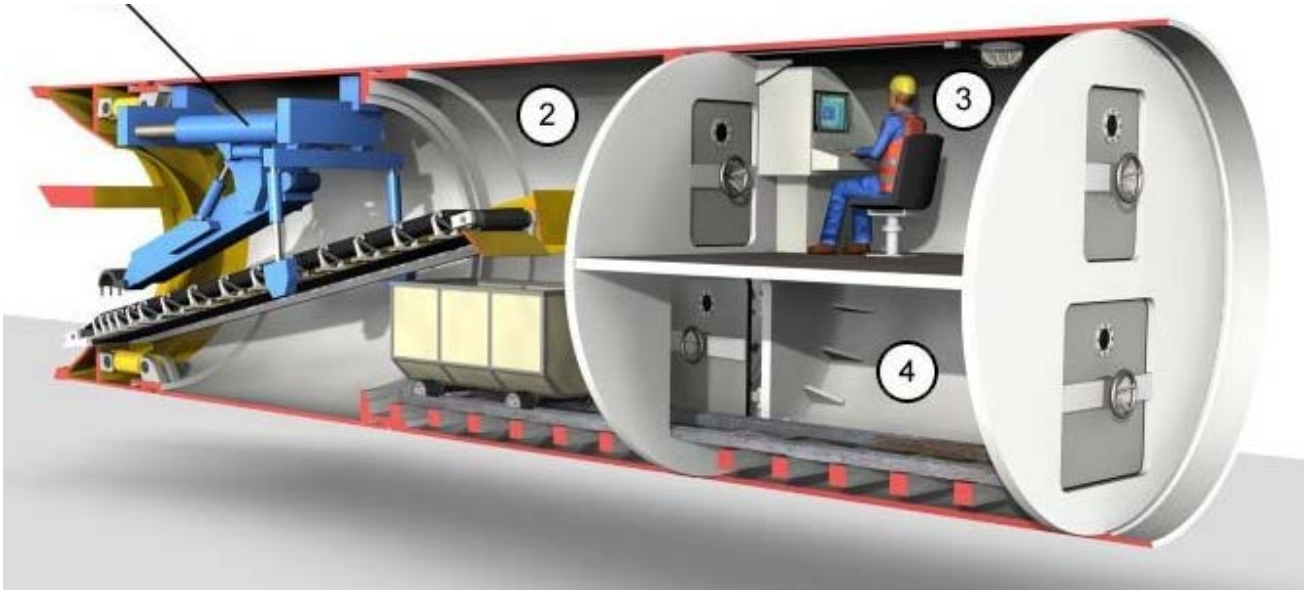
Οι ασπίδες αυτές δίνουν τη δυνατότητα εξισορρόπησης της πίεσης του νερού στο μέτωπο με εξάσκηση αντίστοιχης πίεσης αέρα. Τούτο στοχεύει στη μείωση της εισροής του νερού σε αποδεκτά επίπεδα. Προσοχή πρέπει να δίνεται, ώστε η πίεση του αέρα να μην υπερβαίνει εκείνα τα όρια που θα προκαλέσουν ροή αέρα από το μέτωπο της σήραγγας προς το πέτρωμα και στη συνέχεια εκτίναξη του εδάφους στην επίγεια επιφάνεια. Η

αεροδιαπερατότητα του πετρώματος, η κατανάλωση αέρα και ο σχετικός κίνδυνος εκτίναξης (blow-out) είναι τα βασικά κριτήρια για την επιλογή της μηχανής. Έγχυση πολφού μπεντονίτη στο μέτωπο εκσκαφής μπορεί να μειώσει τοπικά τη διαπερατότητα. Κύριο πεδίο εφαρμογής είναι γεωμάζες μη αυτοφερόμενες με μέτρια έως μικρή διαπερατότητα ($k \leq 10^{-4}$m/s), με παρουσία υπόγειων υδάτων σε κορεσμένα υδαρή εδάφη με ενδοστρώσεις. Κατά την εκσκαφή υπό τον υδροφόρο ορίζοντα, το μέτωπο εργασίας βρίσκεται διαρκώς υπό πίεση αέρα και η μηχανή εκτελεί εργασίες σε κλειστό τρόπο λειτουργίας. Η περιστρεφόμενη κοπτική κεφαλή εκσκάπτει το πέτρωμα, ενώ η υδροστατικής πίεση του εδάφους εξισορροπείται από την πίεση του αέρα. Τα μπάζα εξάγονται από τον υπό πίεση θάλαμο εκσκαφής χρησιμοποιώντας μια περιστρεφόμενη χοάνη με βαλβίδα τύπου μπάλας, και στη συνέχεια χύνονται στο αρχικό σύστημα αποκομιδής μπαζών. Τα κύρια συστατικά της μηχανής είναι:

- Περιστρεφόμενη κοπτική κεφαλή εξοπλισμένη με κοπτικές λεπίδες ή δόντια.
- Την προστατευτική κυλινδρική ασπίδα που περιέχει όλα τα κύρια συστατικά της μηχανής. Το μπροστινό μέρος κλείνει με ένα πέτασμα το οποίο εξασφαλίζει το διαχωρισμό μεταξύ του υπό πίεση θαλάμου εκσκαφής που στεγάζει την κοπτική κεφαλή, και του υπό ατμοσφαιρική πίεση χώρου της μηχανής.
- Διαμήκη έμβολα ώθησης.

8.3.1.2 Μερική κοπή (SM-T3)

Στις μηχανές η εξόρυξη επιτυγχάνεται, αντί της ολομέτωπης, με μερική εκσκαφή του μετώπου. Η χρήση τους είναι ενδεδειγμένη για εδάφη χαμηλής διαπερατότητας χωρίς σημαντικές ασυνέχειες (δηλ. χωρίς τον κίνδυνο ξαφνικής απώλειας πίεσης αέρα), για την εκσκαφή σηράγγων μικρής διαμέτρου. Είναι κατάλληλες για εφαρμογή όταν το μέτωπο εκσκαφής βρίσκεται κάτω από την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα καθώς και σε μαλακό έδαφος. Η μηχανή διαθέτει κατάλληλο διάφραγμα έτσι ώστε μόνο ο θάλαμος εκσκαφής να τίθεται υπό πίεση αέρα. Περιλαμβάνει επίσης βραχίονες εκσκαφής και το υλικό της εκσκαφής απομακρύνεται από τον θάλαμο της κεφαλής κοπής με τη χρήση του συστήματος του μεταφορικού κοχλία. Όπως συμβαίνει σε κάθε περίπτωση χρήσης πεπιεσμένου αέρα, υπάρχει πάντα η πιθανότητα απώλειας αέρα μέσω του εδάφους και απότομης εκτόνωσης. Οι μηχανές αυτές έχουν μικρότερη αποδοτικότητα από της ολομέτωπης διάνοιξης, έχουν όμως μικρότερο κόστος και δύνανται να διανοίγουν και διατομές διαφορετικές της κυκλικής.



Σχήμα 8-12. Ασπίδα στήριξης μετώπου με πιεσμένο αέρα «SM-T3» - Herrenknecht

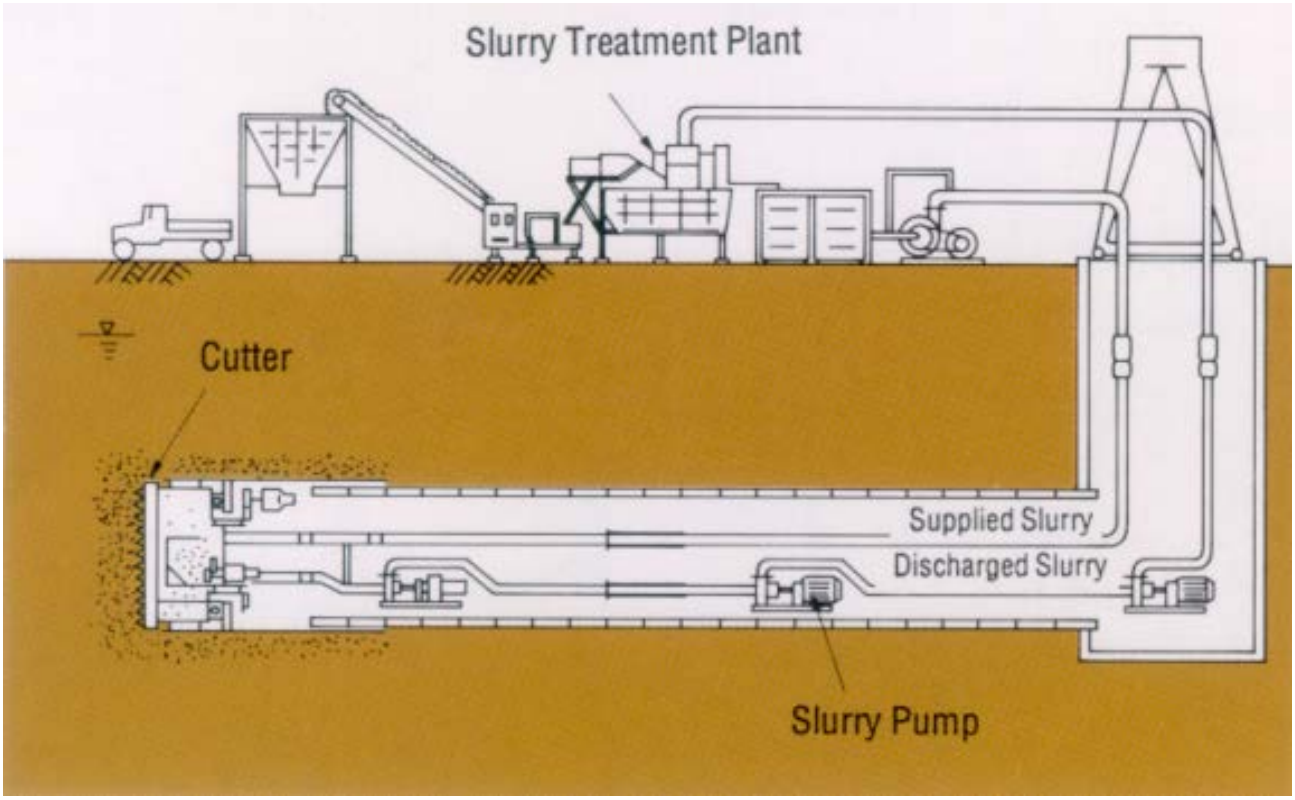
8.3.2 Ασπίδες πολφού

Κατά τη χρήση ασπίδων πολφού (Slurry shield), το εκσκαφθέν υλικό περιέχει 10% στερεά και 90% υγρά, ενώ μεταφέρεται έξω από τη σήραγγα στην περιοχή διαχωρισμού στο εργοταξιακό χώρο, μέσω συστήματος αντλιών. Το εύρος της εφαρμογής αυτών των ασπίδων σε εδάφη μπορεί να χαρακτηριστεί από την

κοκκομετρική κατανομή, στην οποία κυριαρχούν η άμμος και η ιλύς. Το σύνολο των κόκκων ιλύος δεν μπορεί να υπερβαίνει το 30%.

8.3.2.1 Ολομέτωπη κοπή *(SM-V4)*

Στις ασπίδες αυτές (Σχήμα 8-14) η εκσκαφή πραγματοποιείται από την κοπτική κεφαλή, ενώ η στήριξη του μετώπου παρέχεται από πολφό (Slurry) υδατικού εναιωρήματος μπεντονίτη ή αργίλου. Το υγρό στήριξης δημιουργεί μια ελαφρώς διαπερατή από αέρα μεμβράνη στο μέτωπο της εκσκαφής η οποία διευκολύνει την στήριξη του εδάφους κατά τη χρήση αέρα ή υγρού υπό πίεση. Ένα στεγανό διάφραγμα διαχωρίζει το θάλαμο εκσκαφής από το σώμα της μηχανής. Το αιώρημα πολφού διοχετεύεται στο θάλαμο εκσκαφής και ασκεί πίεση στο μέτωπο εκσκαφής. Τα μπάζα αποτελούνται από το φυσικό έδαφος εκσκαφής αναμιγμένο με τον πολφό μπεντονίτη ή αργίλου. Το προκύπτον μείγμα αντλείται (υδραυλική αποκομιδή) από το θάλαμο εκσκαφής σε μια μονάδα διαχωρισμού που βρίσκεται στην επιφάνεια, η οποία επιτρέπει στον πολφό μπεντονίτη/αργίλου να ανακυκλωθεί μερικά (*Σχήμα 8-13*)



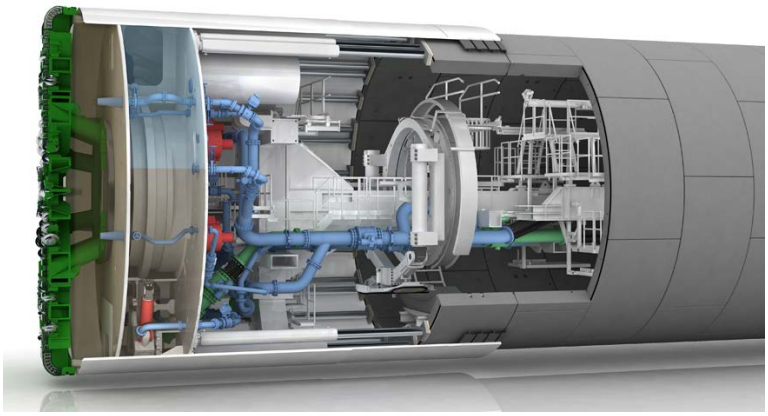
Σχήμα 8-13. Αποκόμιση των προϊόντων της εκσκαφής ασπίδων πολφού.

Τα κύρια συστατικά της μηχανής είναι:

- Κοπτική κεφαλή με δίσκους, λεπίδες ή δόντια.
- Προστατευτική ασπίδα που περιέχει όλα τα κύρια συστατικά της μηχανής. Το έμπροσθεν μέρος είναι σφραγισμένο με διάφραγμα το οποίο εξασφαλίζει το διαχωρισμό μεταξύ της ασπίδας και του υπό πίεση θαλάμου εκσκαφής που περιέχει την κοπτική κεφαλή.
- Διαμήκη έμβολα ώθησης.
- Σύστημα διαχωρισμού πολφού και μπαζών, που συνήθως βρίσκεται στην επιφάνεια.



(α) Μηχανή ολομέτωπης κοπής SM-V4-Herrenknecht



(β) Μηχανή ολομέτωπης κοπής TBM- S4 - Herrenknecht

Σχήμα 8-14. Ασπίδες πολφού

Οι ασπίδες πολφού αναπτύχθηκαν στην Ιαπωνία και στη Γερμανία. Στην Ιαπωνία, η Mitsubishi παρήγαγε την πρώτη δοκιμαστική ασπίδα με στήριξη πολφού το 1967, και στη συνέχεια το 1970 παρήγαγε την πρώτη μεγάλη ασπίδα πολφού διαμέτρου 7.20 m που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή της σιδηροδρομικής γραμμής Keiyo κάτω από ένα κανάλι. Έκτοτε αυτό το είδος ασπίδας έχει παρασκευαστεί από πολλές βιομηχανίες στην Ιαπωνία. Στην Ευρώπη, η ασπίδα πολφού παρήχθη με ιαπωνική άδεια από την Markham στη Μεγάλη Βρετανία, και τις NFM και FCB στη Γαλλία. Στη Γερμανία οι ασπίδες πολφού ξεκίνησαν να αναπτύσσονται το 1972. Η εταιρεία Wayss & Freytag ανάπτυξε το Hydroshield και το χρησιμοποίησε το 1974 για την κατασκευή του κεντρικού αγωγού Αμβούργου-Wilhelmsburg κάτω από το λιμάνι του Αμβούργου. Η εξωτερική διάμετρος της ασπίδας ήταν 4.48 m. Στη Γερμανία οι όροι Hydroshield και Mixshield σημαίνουν ασπίδες ολομέτωπης κοπής με στήριξη μετώπου με πολφό υπό πίεση. Ως πολφός γενικά χρησιμοποιούνται με επιτυχία εναιωρήματα μπεντονίτη. Οι ροϊκές ιδιότητες διατμητικής αντοχής και ιξώδους, και η πυκνότητα του πολφού προσαρμόζονται ώστε να ταιριάζουν στις ιδιότητες της γεωμάζας και πρέπει να παρακολουθούνται συνεχώς.

Η απαιτούμενη πίεση στήριξης ρυθμίζεται με τον καθορισμό των ποσοτήτων που αντλούνται από τις αντλίες τροφοδότησης και απαγωγής. Οι απαιτούμενες και μέγιστες πιέσεις στήριξης πρέπει να υπολογίζονται για ολόκληρο το μήκος της σήραγγας πριν από την έναρξη της διάνοιξης. Η εκσκαφή του μετώπου πραγματοποιείται από έναν τροχό κοπής εξοπλισμένο με εργαλεία και υδραυλικά καθαριζόμενο. Η παροχή μιας μεταγενέστερης μονάδα διαχωρισμού είναι απαραίτητη. Εφόσον απαιτείται η είσοδος στο θάλαμο εκσκαφής, π.χ. για την αλλαγή εργαλείων ή αφαίρεση εμποδίων, το ρευστό στήριξης αντικαθίσταται από πιεσμένο αέρα. Στο μέτωπο, το ρευστό στήριξης έχει δημιουργήσει μία σχετικά αδιαπέραστη μεμβράνη σφράγισής του, που ονομάζεται κρούστα φίλτρου (filter cake), του οποίου ωστόσο η διάρκεια ζωής περιορίζεται από τον κίνδυνο της ξήρανσης. Αυτή η μεμβράνη επιτρέπει τη στήριξη του μετώπου από τον πιεσμένο αέρα και αν απαιτείται πρέπει να ανανεώνεται τακτικά. Το εναιώρημα στήριξης μπορεί να κατεβεί πλήρως ή μερικώς, και να αντικατασταθεί από πιεσμένο αέρα. Πέτρες και τεμάχη βράχου μπορούν να θραύονται σε ένα αποδεκτό μέγεθος, είτε από κοπτικούς δίσκους στον τροχό κοπής ή / και από θραυστήρες στο θάλαμο εργασίας. Σε σταθερό έδαφος, η ασπίδα πολφού μπορεί να εκσκάπτει χωρίς πίεση με ανοικτό μέτωπο, χρησιμοποιώντας νερό ως μέσο μεταφοράς. Οποιαδήποτε πρόσθετη μηχανική στήριξη του μετώπου από τον τροχό κοπής, θα πρέπει να θεωρείται ως μία πρόσθετη ασφάλεια, και η στηρικτική του δράση δεν θα πρέπει να συμπεριλαμβάνεται στους υπολογισμούς ευστάθειας.

Οι ασπίδες πολφού χρησιμοποιούνται κυρίως σε αδρής ή μικτής διαβάθμισης κόκκων εδάφη Ο υδροφόρος ορίζοντας πρέπει να είναι πάνω από τη στέψη της σήραγγας με ένα επαρκές περιθώριο ασφαλείας. Πολύ διαπερατά εδάφη παρεμποδίζουν το σχηματισμό της μεμβράνης και τη μεταφορά της πίεσης στήριξης. Αν η διαπερατότητα είναι μεγαλύτερη από 5×10^{-3} m/s, υπάρχει ο κίνδυνος το εναιώρημα μπεντονίτη να ρεύσει ανεξέλεγκτα στο έδαφος. Το πεδίο εφαρμογής μπορεί να επεκταθεί με την προσθήκη λεπτόκοκκου υλικού, πληρωτικού (φίλλερ) ή πρόσθετου για τη βελτίωση των ροϊκών ιδιοτήτων. Εναλλακτικά, μπορεί να εφαρμοστούν πρόσθετα μέτρα για τη μείωση της διαπερατότητας του εδάφους. Υψηλή περιεκτικότητα σε

λεπτόκοκκα μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα στην εγκατάσταση διαχωρισμού, καθώς είναι τεχνικά αδύνατο να διαχωριστεί το κλάσμα αργίλου και μπεντονίτη.

Κύριο πεδίο εφαρμογής είναι μαλακή γεωμάζα με περιορισμένη ικανότητα αυτοστήριξης παρουσία υπόγειων υδάτων. Είναι κυρίως κατάλληλη για εκσκαφή σε έδαφος που αποτελείται από άμμο και χαλίκια με ιλύ, κάτω από υψηλές υδροστατικές πιέσεις. Η χρήση δίσκων κοπής δίνει επίσης τη δυνατότητα στη μηχανή να εκσκάπτει και μέσα σε βράχο, ενώ η εγκατάσταση ενός θραυστήρα στο θάλαμο εκσκαφής επιτρέπει σε οποιαδήποτε μάζα που δεν θα περνά μέσα από το υδραυλικό σύστημα αποκομιδής να συντρίβεται. Άργιλοι με πιο στερεή συνεκτικότητα που οδηγούν σε φράξιμο των ανοιγμάτων εισόδου, και κροκαλοπαγή που οδηγούν σε μεγάλη αύξηση της απαιτούμενης ροπής για την υπερνίκηση των δυνάμεων τριβής στον τροχό κοπής, οδηγούν, ιδιαίτερα τις μικρότερες ασπίδες, σε δυσκολίες εγκατάστασης κατάλληλων κινητήρων περιστροφής, και περιορίζουν τα όρια χρήσης των ασπίδων πολφού. Πολυμερή μπορούν να προστεθούν για την εκσκαφή εδάφους που περιέχει πολύ ιλύ και άργιλο. Ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των ασπίδων πολφού είναι ο τύπος του υγρού στήριξης που χρησιμοποιείται (συνήθως ένα εναιώρημα αργίλου), η κατασκευή του τροχού κοπής, και η μέθοδος ρύθμισης και ελέγχου της πίεσης στήριξης.

8.3.2.1.1Ιαπωνικές ασπίδες

Ο τροχός κοπής των Ιαπωνικών ασπίδων πολφού είναι επίπεδος και σχετικά κλειστός. Αυτός παρέχει μια μηχανική δράση στήριξης κατά τη διάρκεια διακοπών, εκτός από τη στήριξη του πολφού. Η μοναδική πρόσβαση προς το μέτωπο, π.χ. για την αφαίρεση εμποδίων, είναι μέσα από λίγα παράθυρα, τα οποία είναι κλειστά κατά τη διάρκεια της εκσκαφής. Τα κοπτικά εργαλεία, γενικά αποξεστήρες, διατάσσονται σε διπλές σειρές σε ακτίνες, κάνοντας δυνατή την εκσκαφή και στις δύο κατευθύνσεις. Το έδαφος μπορεί να περνά μέσω σχισμών που διατάσσονται παράλληλα με τα εργαλεία κοπής, με το πλάτος τους να είναι προσαρμοσμένο ώστε ταιριάζει στο αναμενόμενο μέγιστο μέγεθος κόκκου. Οι σχισμές κατακρατούν οποιοδήποτε υλικό είναι μεγάλο για μεταφορά πολφού.

Ανάλογα με την απαιτούμενη ροπή στρέψης του τροχού κοπής, ο τροχός μπορεί να λαμβάνει κίνηση από έναν κεντρικό άξονα, ή περιμετρικά (τύπος τύμπανο) ή μέσω αντηρίδων σε ενδιάμεσα σημεία του τροχού κοπής (τύπου κεντρικού κώνου).

Το ρευστό στήριξης τροφοδοτείται στην κορυφή του θαλάμου εκσκαφής και το μίγμα εδάφους-εναιωρήματος απομακρύνεται στον πυθμένα, κοντά σε ένα πτερύγιο ανάμιξης, που αποσκοπεί στην αποφυγή διαχωρισμού και στην επίτευξη ομοιογενούς μείγματος για αποκόμιση. Στις ασπίδες πολφού, η πίεση υποστήριξης στο μέτωπο ελέγχεται άμεσα με τη ρύθμιση της άντλησης τροφοδοσίας και αποκόμισης του υγρού στήριξης στο θάλαμο εκσκαφής. Η πίεση στήριξης μετρείται από έναν ηλεκτρικό αισθητήρα πίεσης στον θάλαμο εκσκαφής και στους σωλήνες τροφοδοσίας και αποκόμισης και συγκρίνεται σε έναν υπολογιστή με την προβλεπόμενη πίεση στήριξης, και οι αντλίες και βαλβίδες στην κυκλοφορία εναιωρήματος ρυθμίζονται ανάλογα. Η στεγάνωση περιμετρικά στο πέτρωμα επιτυγχάνεται με παρεμβύσματα πολλών χειλιών στην ουρά της ασπίδας.

Δεδομένου ότι το μέτωπο δεν είναι ορατό, η σταθερότητα του μπορεί να ελεγχθεί μόνο με τη σύγκριση της μάζας του θεωρητικού και πραγματικού όγκου εκσκαφής. Ο πραγματικός όγκος εκσκαφής προσδιορίζεται με τη μέτρηση της πυκνότητας του εναιωρήματος στήριξης, και ο θεωρητικός όγκος εκσκαφής υπολογίζεται από την πυκνότητα βάρους, τη στερεοποίηση και το λόγο κενών. Αυτά πρέπει να εκτιμώνται από διερευνητικές γεωτρήσεις πραγματοποιημένες προηγουμένως.

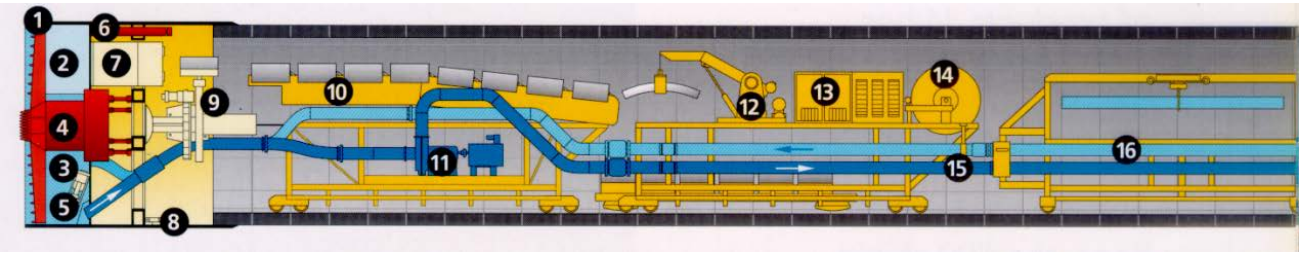
8.3.2.1.2Γερμανικές ασπίδες

Το πρώτο Hydroshield (Υδρασπίδα) αναπτύχθηκε από την Wayss & Freytag. Όλα τα επόμενα Hydroshield της αγοράς βασίζονται στον αρχικό τύπο. Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά ενός συμβατικού Hydroshield είναι ο αστεροειδής τροχός κοπής και η διαίρεση του θαλάμου εκσκαφής σε δύο μέρη από ένα βυθισμένο τοιχίο. Το έδαφος εκσκάπτεται από τον τροχό κοπής (1), που περιστρέφεται εντός του μπεντονίτη, και αναμιγνύεται με αυτόν. Η περιοχή της ασπίδας, εντός της οποίας περιστρέφεται ο τροχός κοπής, ονομάζεται θάλαμος εκσκαφής (2), και διαχωρίζεται από το τμήμα της ασπίδας, που βρίσκεται υπό ατμοσφαιρική πίεση, από το διάφραγμα πίεσης (3). Το εναιώρημα μπεντονίτη που παροχετεύεται μέσω του αγωγού τροφοδοσίας (4) ωθείται στο θάλαμο εκσκαφής από μια φυσαλίδα αέρα (5) με πίεση κατάλληλη για το έδαφος και τις πιέσεις νερού που επικρατούν. Αυτό αποτρέπει την ανεξέλεγκτη είσοδο εδάφους ή την απώλεια ευστάθειας του μετώπου. Η πίεση στήριξης στο θάλαμο εκσκαφής δεν ελέγχεται άμεσα μέσω της πίεσης του ασυμπίεστου εναιωρήματος, αλλά μέσω μιας συμπιεστής φυσαλίδας αέρα. Για το λόγο αυτό, ο θάλαμος εκσκαφής διαιρείται από το βυθισμένο

τοιχίο (6). Η περιοχή μεταξύ του βυθισμένου τοιχίου και του διαφράγματος πίεσης ονομάζεται θάλαμος πίεσης ή εργασίας.

Η ουσιαστική διαφορά της διαδικασίας αυτής από την ιαπωνική ασπίδα πολφού είναι ο ενεργός έλεγχος με μεγάλη ακρίβεια της πίεσης του εναιωρήματος από την φυσαλίδα (bubble) αέρα πίσω από ένα βυθισμένο τοιχίο. Η αποσύνδεση του ελέγχου της πίεσης στήριξης από την ποσότητα του εναιωρήματος που κυκλοφορεί στο κύκλωμα πολφού και η συμπιεστότητα του αέρα κατά τις διακυμάνσεις του όγκου, έχουν συμβάλει στην επιτυχία των μηχανών αυτών. Ξαφνική απώλεια του μέσου στήριξης, π.χ. κατά την είσοδο σε ρηξιγενείς ζώνες, μπορεί να αναληφθεί χωρίς την κατάρρευση της πίεσης στήριξης στο μέτωπο, με μια ευρεία ανοχή απώλειας, η οποία αντιστοιχεί περίπου στον όγκο του εναιωρήματος στον οπίσθιο θάλαμο. Είναι επίσης δυνατό να μεταβληθεί ο όγκος του εναιωρήματος σε κυκλοφορία, εάν αυτό είναι αναγκαίο για τη βελτίωση της απομάκρυνσης του υλικού εκσκαφής, χωρίς άμεση επίδραση στην πίεση στήριξης. Η φυσαλίδα αέρα και το βυθισμένο τοιχίο επιτρέπουν την πρόσβαση στο θάλαμο εργασίας μέσω ενός αεροφράκτη που βρίσκεται στο επάνω μέρος της ασπίδας, γεγονός που καθιστά τον καθαρισμό από εμπόδια ευκολότερο σε σχέση με τις Ιαπωνικές ασπίδες πολφού. Προκειμένου να πραγματοποιηθούν εργασίες επισκευής ή συντήρησης στον τροχό κοπής, το εναιώρημα μπεντονίτη απομακρύνεται από το θάλαμο εκσκαφής και αντικαθίσταται από πιεσμένο αέρα. Το φίλτρο κρούστας σφραγίζει προσωρινά το μέτωπο και επιτρέπει τη στήριξη από πιεσμένο αέρα μόνο. Το φίλτρο κρούστας συρρικνώνεται κατά την επαφή του με τον αέρα και πρέπει να ανανεώνεται σε τακτά χρονικά διαστήματα, προκειμένου να περιορίζονται οι απώλειες αέρα. Ο ανοικτός αστέρας που περιστρέφεται μέσα στο θάλαμο εκσκαφής είναι ο κλασικός τροχός κοπής του Hydroshield. Ωστόσο, κλειστοί τροχοί κοπής χρησιμοποιούνται συχνά σε ετερογενή εδάφη με εγκλείσματα βράχων. Η περιμετρική στεφάνη βελτιώνει τη δράση στήριξης, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια παρεμβάσεων πιεσμένου αέρα. Η ανοιχτή μορφή του τροχού κοπής ως ένα ανοικτό αστέρι με αυτόνομες ακτίνες επιτρέπει στο υλικό εκσκαφής να ρέει άμεσα πίσω από τον τροχό κοπής στον θάλαμο εκσκαφής. Λόγω του ανοικτού τροχού κοπής, είναι απαραίτητη η τοποθέτηση εσχάρας μπροστά από την εισαγωγή του σωλήνα αναρρόφησης, ώστε να συγκρατείται το υλικό με μέγεθος κόκκου μεγάλο για την άντληση.

Στο Hydroshield (HS) (Maidl, 2004), που είναι μία ασπίδα πολφού, η λειτουργία είναι πανομοιότυπη. Η διαφορά έγκειται στον τρόπο μεταφοράς της πίεσης στήριξης στο μέτωπο. Στο HS υπάρχουν δύο διαφράγματα, ένα που χωρίζει το θάλαμο εκσκαφής από τη σήραγγα και άλλο που χωρίζει το θάλαμο σε δύο μέρη, αφήνοντας μια επικοινωνία στο κάτω μέρος. Το επάνω μέρος αυτού του ενδιάμεσου θαλάμου είναι πλήρες με μαξιλάρι πιεσμένου αέρα. Η σύνδεση με έναν αεροσυμπιεστή και σύστημα βαλβίδων ελέγχου επιτρέπει τη ρύθμιση της πίεσης υποστήριξης στο μέτωπο ανεξάρτητα από το υδραυλικό κύκλωμα παροχής πολφού μπεντονίτη και αποκομιδής του μίγματος πολφού και φυσικού εδάφους.

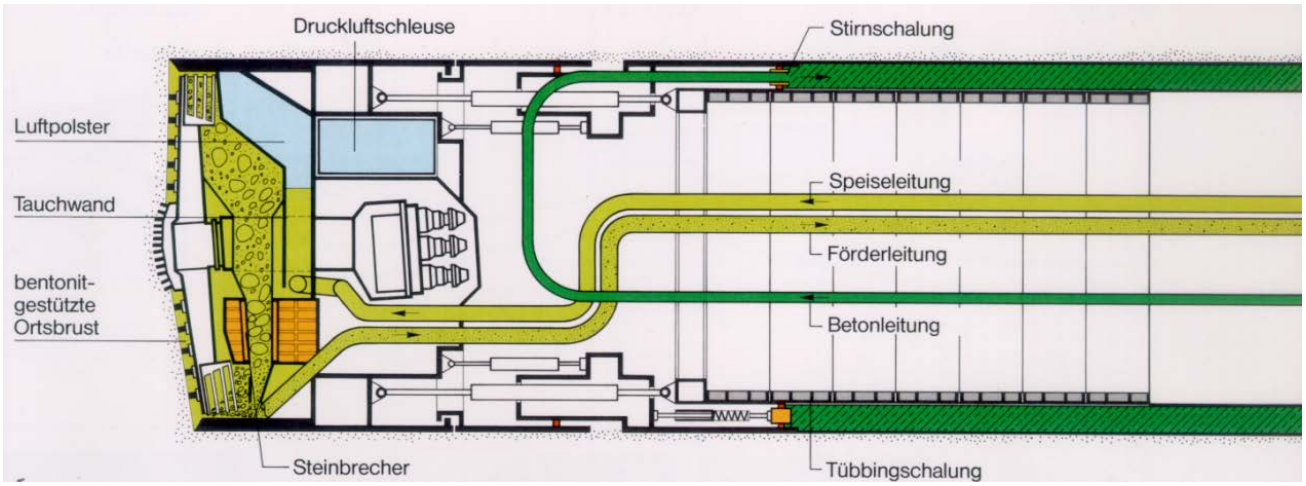


Σχήμα 8-15. Διάταξη ασπίδας πολφού. (1) Κοπτικός τροχός, (2) Φυσαλίδα αέρα, (3) αιώρημα μπεντονίτη, (4) μονάδα διάνοιξης, (5) θραυστήρας, (6) έμβολο ώσης, (7) αεροφράκτης, (8) ουρά ασπίδας, (9) ανυψωτής, (10) μεταφορέας προκατασκευασμένων στοιχείων, (11) αντλία πολφού, (12) γερανός προκατασκευασμένων στοιχείων, (13) πίνακας ηλεκτρικών, (14) εκτυλίχτρια καλωδίων, (15) σωλήνα εξόδου, (16) σωλήνα εισόδου

Στις ασπίδες αυτές, όπως φαίνεται στην στήλη 3 του παραπάνω πίνακα και στο *Σχήμα 8-15*, ο χώρος του μετώπου είναι πληρωμένος με πολφό κατά βάση από αιώρημα μπεντονίτη. Η υποστήριξη στο μέτωπο παρέχεται με τη βοήθεια αυτού του θιξοτροπικού υδαρούς κονιάματος (ε.β. 1.1 ÷ 1.25). Η βασική αρχή λειτουργίας συνίσταται στην εισπίεση του πολφού στο χώρο του μετώπου. Τούτο έχει ως αποτέλεσμα το έδαφος του μετώπου να εμποτίζεται σε μικρό βάθος και να δημιουργείται ένα φίλτρο (filter cake) πάνω στο οποίο δρα η πίεση του πολφού. Το υλικό εκσκαφής συλλέγεται στο δάπεδο, όπου η ανάδευση το υγροποιεί επαρκώς για άντληση έξω από τη σήραγγα, αφού με κατάλληλες διατάξεις απομακρυνθούν οι λίθοι που τυχόν υπάρχουν μέσα στα μπάζα. Εκτός σήραγγας ο μπεντονίτης διαχωρίζεται από τα μπάζα και στη συνέχεια

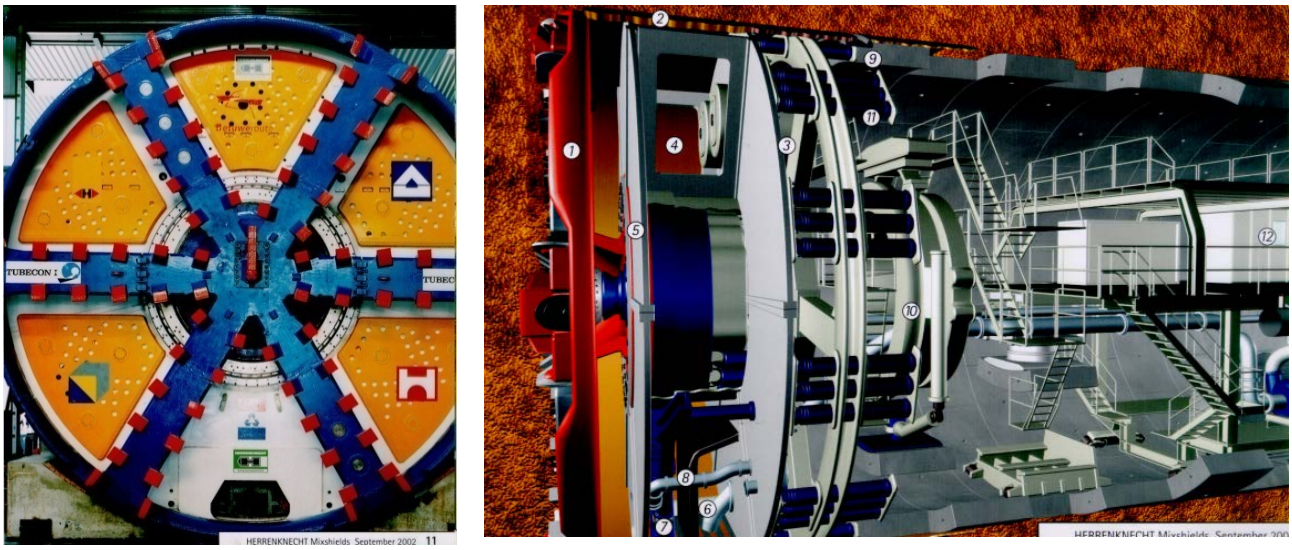
επιστρέφει στο μέτωπο. Η ύπαρξη του πολφού στο χώρο κοπής εξυπηρετεί και στη μείωση της φθοράς των κοπτικών.

Η ασπίδα πολφού με εξώθηση σκυροδέματος (Maidl et al., 1996) από την ουρά της αποτελεί μια αξιόλογη εναλλακτική λύση στη μέθοδο της επένδυσης με προκατασκευασμένα στοιχεία. Μια τέτοια πλήρως εκμηχανισμένη ασπίδα τοποθετεί με πίεση το νωπό ινοπλισμένο σκυρόδεμα της επένδυσης, πίσω από ένα συρόμενο μεταλλότυπο (*Σχήμα 8-16*), το οποίο σε μικρό χρόνο πήζει και αναλαμβάνει φορτία.



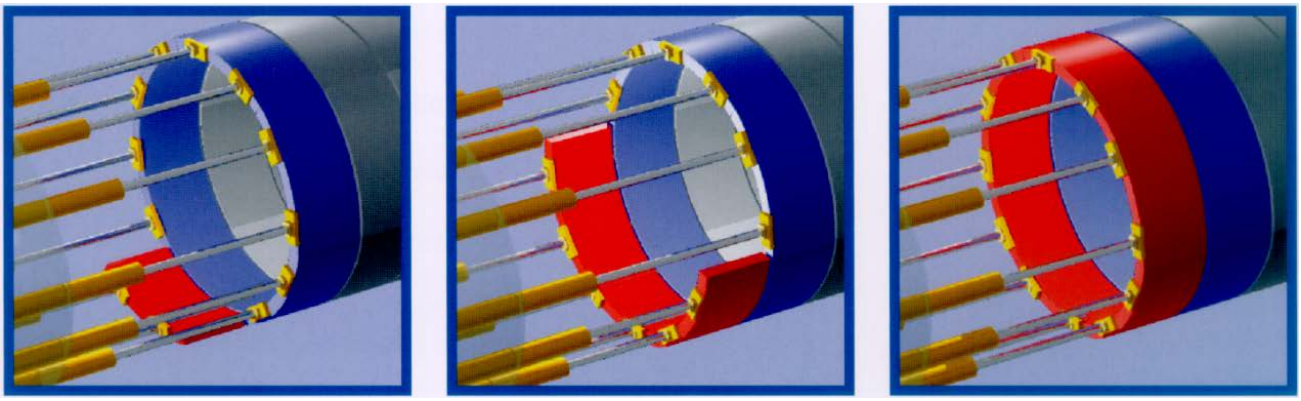
Σχήμα 8-16. Ασπίδα πολφού με εξώθηση του σκυροδέματος της επένδυσης

Η επινόηση του Hydroshield αναπτύχθηκε περαιτέρω από την εταιρεία Wayss & Freytag σε συνεργασία με την Herrenknecht για την παραγωγή του Mixshield, μιας ασπίδας με μετατρέψιμη στήριξη μετώπου, σύμφωνα με τις απαντώμενες συνθήκες εδάφους. Για τα μετατρέψιμα Mixshields είναι γενικά δυνατοί όλοι οι συνδυασμοί, πολφού, ύδατος, αντισταθμιστικής πίεσης εδάφους, πιεσμένου αέρα ή ανοιχτής ασπίδας. Οι διάφοροι τρόποι λειτουργίας επιτρέπουν πεδίο εφαρμογής σε ένα ευρύ γεωλογικό φάσμα. Ωστόσο, τα περισσότερα Mixshields δεν ανασκευάζονται κατά τη διάνοιξη της σήραγγας, αλλά χρησιμοποιούνται αποκλειστικά ως ασπίδες πολφού. Τα σύγχρονα Mixshield είναι εφοδιασμένα με υδραυλικούς θραυστήρες μπροστά από την εσχάρα, για τη μείωση των μεγαλύτερων λίθων σε μέγεθος ικανό να αντλείται. Η συσσώρευση υλικού μπροστά από την εσχάρα παρεμποδίζεται από κατευθυνόμενες δέσμες εναιωρήματος έκπλυσης. Σύμφωνα με τον επικρατούντα τύπο εδάφους, μπορούν να ενσωματωθούν στον τροχό κοπής διάφοροι τύποι κοπτικών εργαλείων.



Σχήμα 8-17. Μηχανή πολφού (Mixshield). Αριστερά κεφαλή. Δεξιά: Εσωτερική διάταξη, (1) κοπτική κεφαλή, (2) ασπίδα, (3) διάφραγμα, (4) φυσαλίδα αέρα, (5) τοίχωμα βύθισης, (6) σωλήνα εξόδου, (7) θραυστήρας, (8) σωλήνα εισόδου, (9) προκατασκευασμένα στοιχεία από σκυρόδεμα, (10) ανυψωτής, (11)έμβολα προώθησης, (12) θάλαμος χειριστή.

Η ασπίδα Mixshield (*Σχήμα 8-17*) είναι μια γενικότερη ασπίδα, που όμως στα περισσότερα έργα έχει χρησιμοποιηθεί ως μία ασπίδα πολφού μόνο. Ένα από τα πλεονεκτήματά της είναι ότι δύναται να εκσκάπτει και συγχρόνως να υποστηρίζει (*Σχήμα 8-18*).



Σχήμα 8-18. Συνεχής λειτουργία ασπίδας - Mixshield

8.3.2.1.3 Αποκόμιση μπαζών

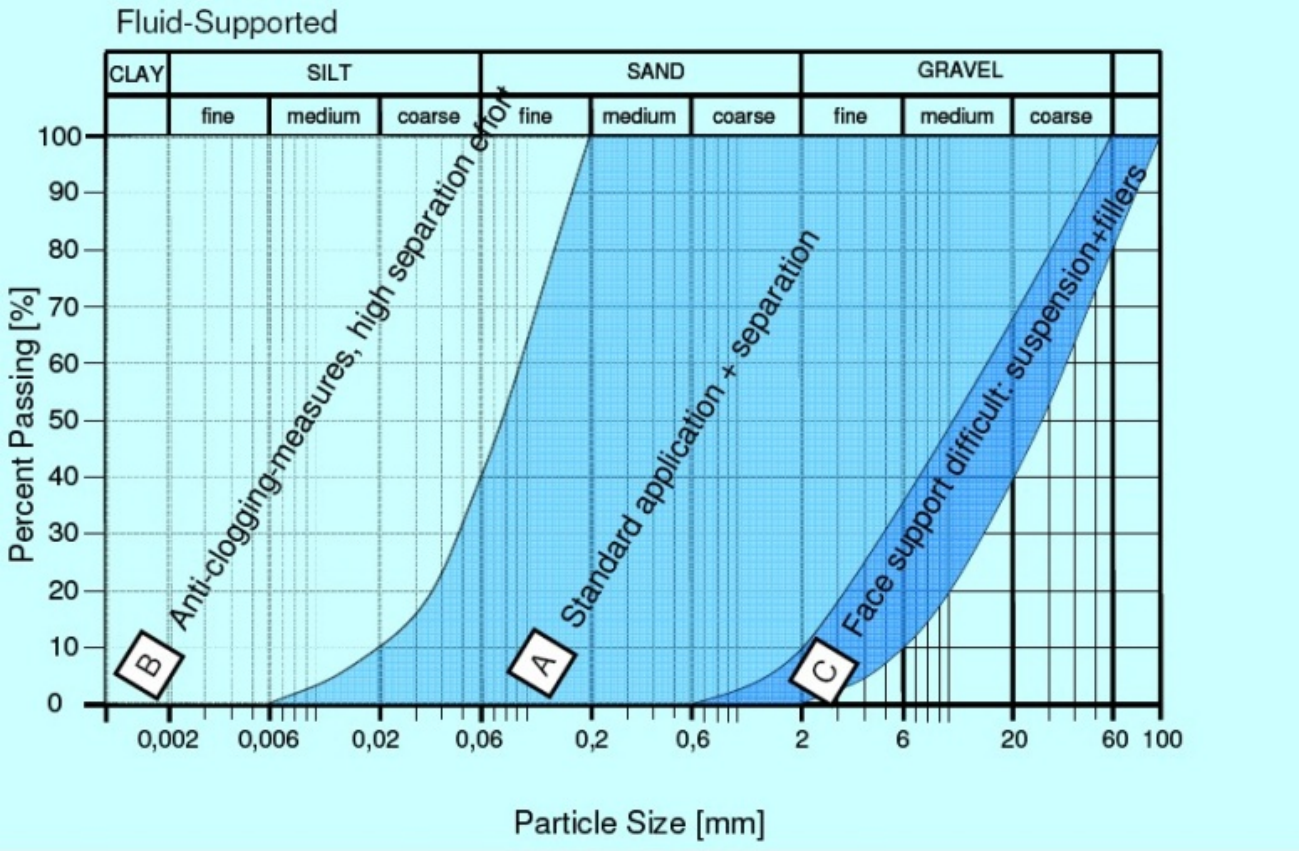
Σε λεπτόκοκκα εδάφη, η ροή του υλικού διαμέσου του τροχού κοπής και μέσα στο θάλαμο εκσκαφής, και η υδραυλική μεταφορά, παρεμποδίζονται συχνά από την προσκόλλησή τους στον εξοπλισμό εκσκαφής και μεταφοράς. Η προσκόλληση οδηγεί σε μείωση της προχώρησης και στο βαθμό χρησιμοποίησης, καθώς μπορεί να απαιτείται τον κοπιώδη χειρωνακτικό καθαρισμό με πιεσμένο αέρα, του τροχού κοπής και του θαλάμου εκσκαφής. Η προσκόλληση σε συνδυασμό με την υψηλή περιεκτικότητα σε αποξεστικά ορυκτά μπορεί να οδηγήσει επίσης σε σημαντική φθορά στον τροχό κοπής και στο θάλαμο εκσκαφής. Το δυναμικό προσκόλλησης ενός εδάφους εκτιμάται από το δείκτη υδαρότητας LI και το δείκτη πλαστικότητας PI. Εκτός από την τάση του εδάφους για πρόσφυση ή συνοχή, η διασπορά του επηρεάζεται επίσης από περαιτέρω παράγοντες που σχετίζονται με τις διαδικασίες και που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη. Η πρόσφυση περιγράφει την ικανότητα του εδάφους να κολλά στις μεταλλικές επιφάνειες του εξοπλισμού εκσκαφής και μεταφοράς, η οποία παρεμποδίζει τη ροή υλικού γύρω από τα εργαλεία και τα ανοίγματα του τροχού κοπής. Η συνοχή μαζί με τη συνεκτικότητα καθορίζει την ικανότητα του κολλήματος και της τάσης των τεμαχίων του εδάφους να συνενώνονται για να σχηματίσουν συσσωματώματα. Όταν το υλικό εκσκαφής συσσωρεύεται μπροστά από την εισαγωγή στο ανάστροφο της ασπίδας, υπάρχει ο κίνδυνος διακοπής της υδραυλικής ροής μεταφοράς. Η διασπορά περιγράφει την ιδιότητα του εδάφους να διαλύεται στο μέσο μεταφοράς και στήριξης, έτσι ώστε να μεταβάλλει τις ροϊκές ιδιότητες του εναιωρήματος. Οι στιφρές και ημι-στερεές άργιλοι έχουν ένα σημαντικό δυναμικό προσκόλλησης. Δεν υπάρχουν ακόμη διαθέσιμες τυποποιημένες μέθοδοι δοκιμών για τη μέτρηση του δυναμικού προσκόλλησης. Εκτός της ορυκτολογικής σύστασης του εδάφους και των ορίων Atterberg, παράγοντες της διαδικασίας έχουν σημαντική επίδραση στον κίνδυνο προσκόλλησης. Τα παρακάτω αξίζει να αναφερθούν:

- Το μέγεθος, η διαμόρφωση και η επικάλυψη των ανοιγμάτων στον τροχό κοπής,
- Η πίεση αναρρόφησης και η γεωμετρική διάταξη της ζώνης εισαγωγής,
- Το σύστημα τροφοδοσίας, η ποσότητα του εναιωρήματος σε κυκλοφορία ή η ταχύτητα ροής στις απειλούμενες ζώνες,
- Ο τύπος και τα γεωμετρικά στοιχεία των σκαπτικών εργαλείων,
- Η διείσδυση και ο ρυθμός προχώρησης.

Ο κίνδυνος προσκόλλησης μπορεί να μειωθεί σημαντικά με το σχεδιασμό του εξοπλισμού εκσκαφής και μεταφοράς έτσι ώστε να βελτιστοποιηθούν οι συνθήκες ροής, με τη βελτιστοποίηση της υδραυλικής τροφοδοσίας και του συστήματος αποκόμισης, και μέσα από τη σωστή επιλογή των σκαπτικών εργαλείων.

Το εύρος εφαρμογής των πρόσμικτων είναι: (Α) πρότυπη εφαρμογή συν διαχωρισμός (Β) λήψη μέτρων προς αποφυγή έμφραξης, προσπάθεια διαχωρισμού και (Γ) υποστήριξη μετώπου (εναιώρημα και φίλτρα). Το

παρακάτω σχήμα καταδεικνύει τα όρια εφαρμογής των μηχανηματων EPB και Slurry ολομέτωπης διάνοιξης, σε συνθήκες όπου συναντώνται διαφορετικοί τύποι εδάφους.



Σχήμα 8-19. Εύρος Εφαρμογής προσμίκτων σε Μηχανήματα Μπεντονιτικού Πολφού-Herrenknecht

8.3.2.2 Μερική κοπή

Αντίστοιχα, η μηχανή τύπου SM-T4 επιτυγχάνει την εξόρυξη με μερική εκσκαφή του μετώπου. Η πίεση του υδροφόρου ορίζοντα και η πίεση του εδάφους στο μέτωπο αντισταθμίζονται με τη χρήση υγρού υποστήριξης ρυθμιζόμενης πίεσης, συνήθως εναιωρήματος μπεντονίτη, στον θάλαμο εκσκαφής. Η μηχανική μερική εκσκαφή του μετώπου εκσκαφής επιτυγχάνεται από τηλεσκοπικό βραχίονα κεφαλής σημειακής κοπής. Τα προϊόντα εκσκαφής μεταφέρονται υδραυλικά, μέσω αντλίας εξαγωγής από τον θάλαμο εκσκαφής στην επίγεια επιφάνεια όπου πραγματοποιείται διαχωρισμός μεταξύ των προϊόντων εκσκαφής και του εναιωρήματος μπεντονίτη. Η ασπίδα πολφού μερικής κοπής του μετώπου δεν έχει αποδειχθεί επιτυχής. Αναφέρονται τα ακόλουθα μειονεκτήματα:

- Σε αντίθεση με την ανοικτή ασπίδα, στην ασπίδα μερικής κοπής του μετώπου η διαδικασία εκσκαφής δεν μπορεί να παρακολουθηθεί οπτικά.
- Η διαμόρφωση του φίλτρου κρούστας και η πίεση στήριξης δεν μπορούν να ελεγχθούν και παρακολουθηθούν επαρκώς
- Η μεταφορά του υλικού εκσκαφής είναι προβληματική, ιδιαίτερα όταν συναντώνται εμπόδια.

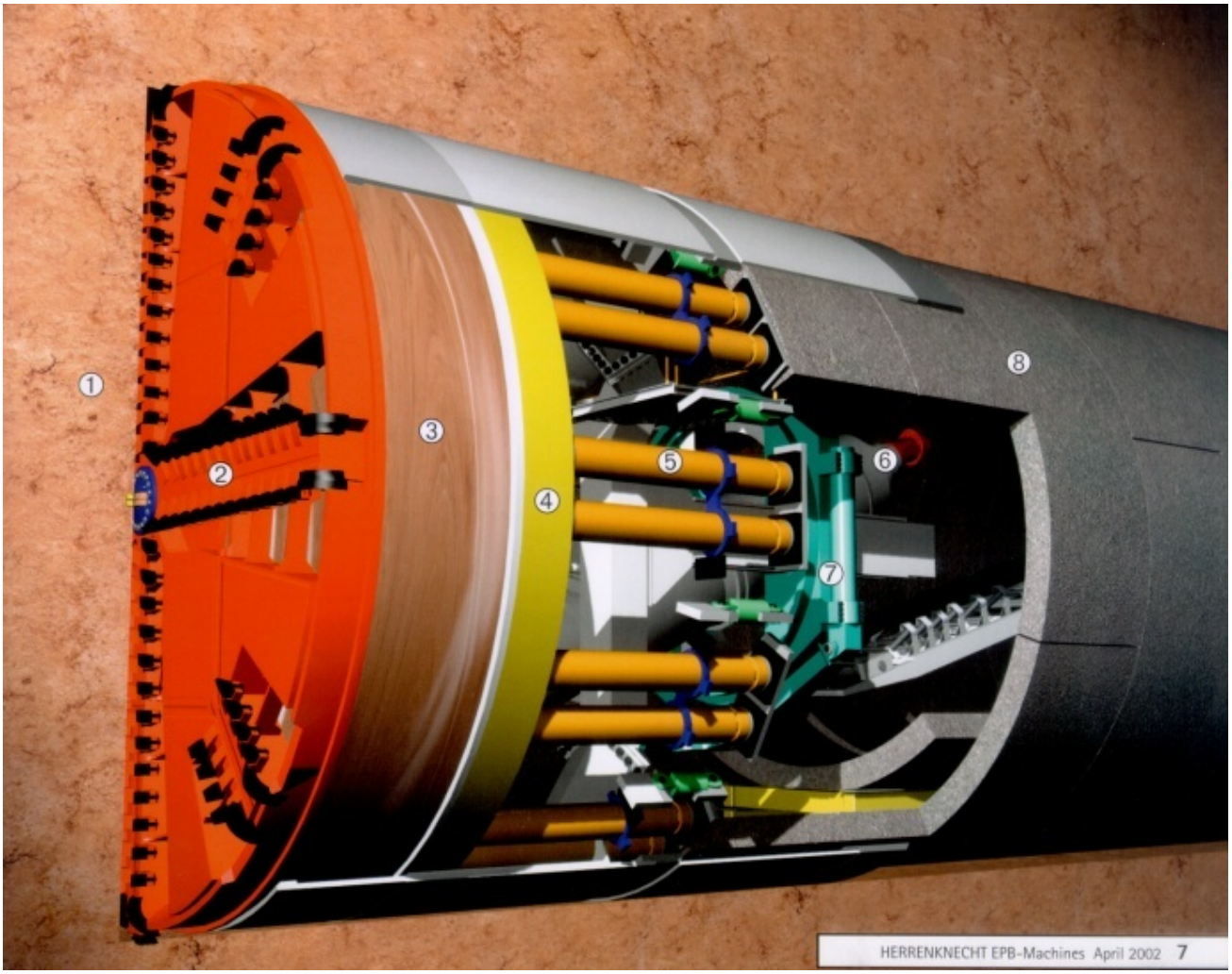
Το Thixshield (Maidl, 2004).είναι μια μηχανή SM-T4 που αναπτύχθηκε από την εταιρεία Holzmann στο τέλος της δεκετίας του 1970. Το Hydrojetshield, είναι επίσης μια μηχανή SM-T4, που αναπτύχθηκε από την Wayss & Freytag AG το 1979, η οποία εκσκάπτει το μέτωπο με την κατευθυνόμενη εκτόξευση δέσμης υγρού στο θάλαμο εκσκαφής. Οι εκτοξευτήρες εκσκαφής είναι διαταγμένοι σε ορθές γωνίες ως προς τον κεντρικό άξονα της ασπίδας στο εσωτερικό της, και έχουν εμβέλεια μέχρι 1.5 m. Κανένα από τα δύο παραπάνω συστήματα δεν μπόρεσε να καθιερωθεί.

8.3.3 Ασπίδες ολομέτωπης κοπής, εδαφικής αντισταθμιστικής πίεσης *(EPBS, SM-V5)*

Η ανάπτυξη των μηχανών αυτών ξεκίνησε το 1970 στην Ιαπωνία, με διάφορες ονομασίες που σήμερα ενσωματώνονται στο διεθνώς χρησιμοποιούμενο όρο EPBS (Earth Pressure Balance Shield). Πρόκειται για εξέλιξη της τυφλής (δηλαδή μη ορατού μετώπου) ασπίδας, που χρησιμοποιούνταν σε συνεκτικά εδάφη πολύ υψηλής πλαστικότητας. Στην τυφλή ασπίδα το έδαφος δεν εκσκάπτεται με μηχανικά μέσα, αλλά εξαναγκάζεται, από την πίεση που ασκείται από τα έμβολα ώσης, να περάσει μέσα από ένα ρυθμιζόμενο άνοιγμα που υπάρχει στο διάφραγμα πίεσης της ασπίδας. Ο έλεγχος των επίγειων καθιζήσεων επιτυγχάνεται με τη ρύθμιση του ανοίγματος, έτσι ώστε ο εξορυσσόμενος όγκος να ισούται με το θεωρητικό όγκο της εκσκαφής.

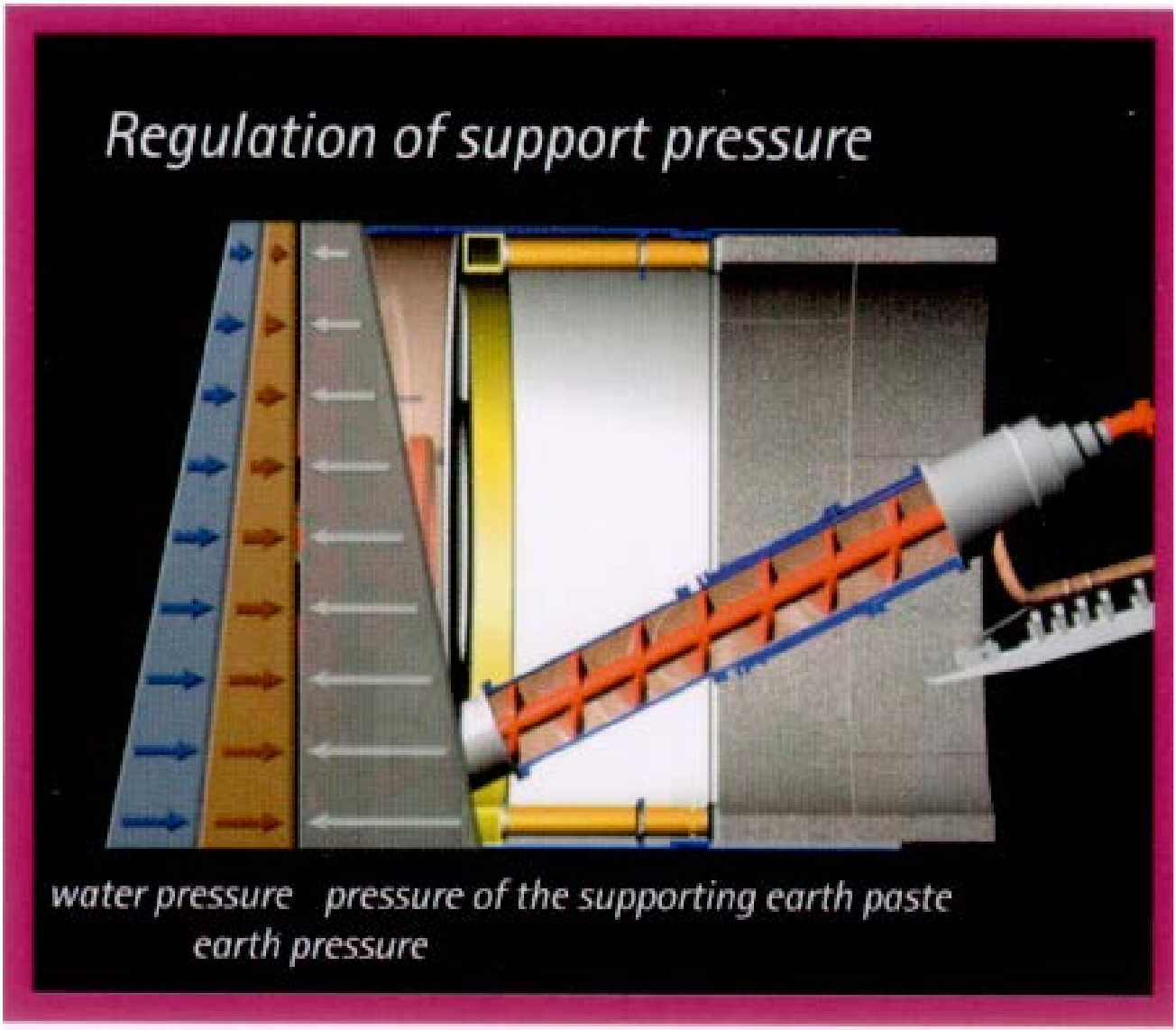
8.3.3.1 Λειτουργία της ασπίδας

Στα EPBS ο χώρος όπου πραγματοποιείται η εκσκαφή σφραγίζεται από την υπόλοιπη ασπίδα με διάφραγμα πίεσης (Σχήμα 8-20 (4)). Ο χώρος μπροστά από το διάφραγμα βρίσκεται υπό πίεση, ενώ ο χώρος πίσω από αυτό είναι σε ατμοσφαιρικές συνθήκες. Μπροστά από το διάφραγμα, ο τροχός κοπής (Σχήμα 8-20 (2)) εφοδιασμένος με εργαλεία κοπής εκσκάπτει τη γεωμάζα (Σχήμα 8-20 (1)). Ο θάλαμος εκσκαφής (plenum chamber) είναι το μέρος της ασπίδας μεταξύ της κοπτικής κεφαλής και του διαφράγματος πίεσης (Σχήμα 8-20 (3)). Στο θάλαμο, το υλικό που εξορύσσεται από το μέτωπο αναζυμώνεται σε ένα πλάσιμο γεωπολτό. Κάδοι ανάμιξης στο πίσω μέρος του τροχού κοπής και στο διάφραγμα πίεσης βοηθούν στην αναζύμωσή της γεωμάζας σε κατάλληλη συνεκτικότητα. Η υπό συμπίεση λάσπη χρησιμοποιείται για τη στήριξη του μετώπου εκσκαφής.



Σχήμα 8-20. Εσωτερική διάταξη EPBS, (1) μέτωπο διάνοιξης, , (2) κοπτική κεφαλή, (3) θάλαμος εκσκαφής, (4) διάφραγμα πίεσης, (5) έμβολα ώσης, (6) ατέρμων κοχλίας, (7) ανυψωτής, (8) επένδυση

Η απομάκρυνση της λάσπης από το θάλαμο εκσκαφής πραγματοποιείται από ένα στεγανό ατέρμονα κοχλία μεταφοράς (Σχήμα 8-20 (6)). Η βαθμίδα της πίεσης μεταξύ του θαλάμου εκσκαφής και της σήραγγας πίσω από το διάφραγμα προκύπτει από την τριβή στο ατέρμονα κοχλία μεταφοράς. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει είτε η λάσπη στον κοχλία να εξασφαλίζει τη στεγανότητα του συστήματος απομάκρυνσης της λάσπης ή να ληφθούν άλλα εναλλακτικό μηχανικά μέτρα. Πλήρης υποστήριξη του μετώπου, ιδιαίτερα του ανώτερου τμήματος, επιτυγχάνεται μόνον αν το έδαφος αναζυμωθεί σε μια μαλακή πλάσιμη μάζα. Τούτο επηρεάζεται σημαντικά από την περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα (μέγεθος κόκκου <0.06 mm). Βελτίωση του εδάφους, για παράδειγμα με μπεντονίτη, πολυμερή ή αφρό, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επεκταθεί το πεδίο εφαρμογής της ασπίδας, δίνοντας προσοχή στην περιβαλλοντική αποδοχή της απόθεσης του υλικού εκσκαφής.



Σχήμα 8-21. Ρύθμιση της πίεσης υποστήριξης και μεταφορά της λάσπης

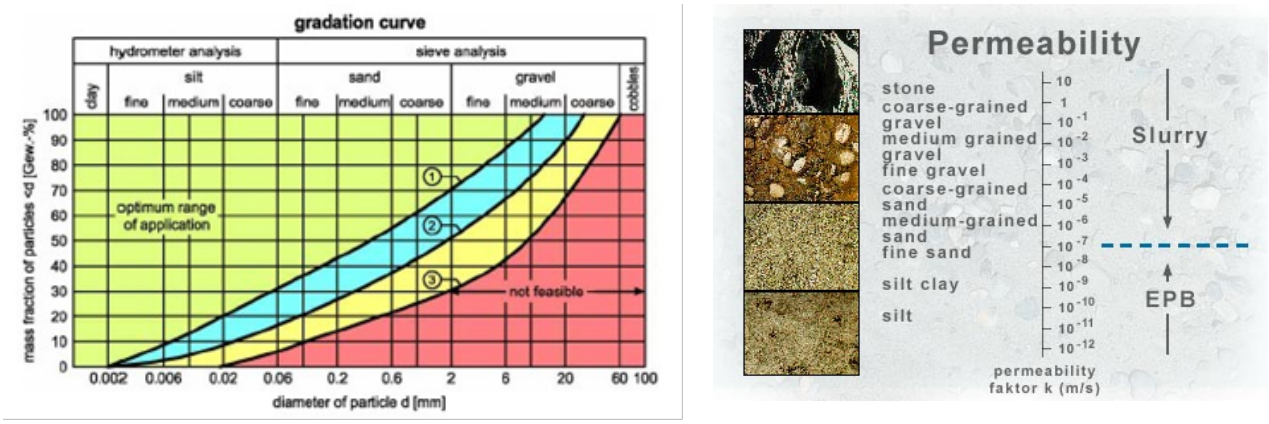
Με την αύξηση της πυκνότητας και της γωνίας τριβής της λάσπης, αυξάνονται σημαντικά οι διακυμάνσεις στην κατανομή της πίεσης στο διάφραγμα και στο μέτωπο. Οι ασπίδες αυτές, ωστόσο, δεν κινδυνεύουν από ξαφνική, μεγάλης κλίμακας κατάρρευση του μετώπου, μέσα στον, γεμάτο λάσπη και συμπυκνωμένο υλικό, θάλαμο εκσκαφής. Η εξισορροπούσα πίεση (Σχήμα 8-21) πρέπει να είναι μικρότερη από το άθροισμα της πίεσης του νερού και της ουδέτερης πίεσης του εδάφους και μεγαλύτερη από την πίεση του νερού και την ενεργό πίεση του εδάφους. Η πίεση αυτή μετρείται σε αισθητήρες εγκαταστημένους στο διάφραγμα και στον τροχό κοπής (Maidl, 2012). Θα πρέπει να σημειωθεί όμως, ότι στο διάφραγμα γύρω από τον ατέρμονα κοχλία, μετρείται μία χαμηλότερη πίεση λόγω της βαθμίδας του υδραυλικού δυναμικού στο θάλαμο εκσκαφής. Η μέτρηση της πίεσης στο θάλαμο εκσκαφής είναι μέρος ενός συστήματος καταγραφής

δεδομένων, που χρησιμεύει στην τεκμηρίωση της προχώρησης και στον έλεγχο ορισμένων παραμέτρων στο κύκλωμα ελέγχου. Με βάση αυτές τις μετρήσεις, η πίεση στο μέτωπο ρυθμίζεται μέσω του ρυθμού επέκτασης του εμβόλων ώσης (Σχήμα 8-20 (5)), της ταχύτητας περιστροφής του ατέρμονα κοχλία, της ρύθμισης του εκκενωτή (βάνα) στο άκρο του κοχλία (*Σχήμα 8-21*), και της έγχυσης παράγοντα βελτίωσης. Μία αύξηση του ρυθμού επέκτασης των εμβόλων ώσης ή μείωση της ταχύτητας περιστροφής του ατέρμονα κοχλία έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της πίεσης της λάσπης στο θάλαμο. Αντίθετα, μια μείωση της επέκτασης των εμβόλων ώσης ή μια αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του ατέρμονα κοχλία έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της πίεσης της λάσπης. Αν η ταχύτητα περιστροφής και ο ρυθμός επέκτασης των εμβόλων είναι εκτός των προκαθορισμένων ορίων, τότε η προχώρηση σταματά και η βάνα στο τέλος του ατέρμονα κοχλία κλείνει. Η χρήση ενός αυτόματου συστήματος ελέγχου επιτρέπει, σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας, την ελαχιστοποίηση των δράσεων του χειριστή της ασπίδας, ο οποίος απλώς θα παρακολουθεί συνεχώς οπτικά τα πιο σημαντικά όργανα. Η πίεση υποστήριξης μπορεί σήμερα να ρυθμίζεται άμεσα, με συνεχή παρακολούθηση και βελτίωση, από συστήματα ελέγχου, όλων των παραμέτρων του βελτιωτικού παράγοντα.

Προκειμένου να δημιουργηθεί η επιθυμητή λάσπη, είναι απαραίτητη η ύπαρξη υπόγειου νερού ή άλλως πρέπει να προστεθεί νερό. Η λάσπη στο θάλαμο θα πρέπει να έχει πλασιμότητα, μαλακή συνεκτικότητα, χαμηλή εσωτερική τριβή, και χαμηλή διαπερατότητα. Στη φυσική τους κατάσταση λίγα εδάφη έχουν αυτές τις ιδιότητες, και ως εκ τούτου πρέπει να επεξεργάζονται. Η καλή πλασιμότητα και η μαλακή συνεκτικότητα των υλικών εξασφαλίζει ότι η πίεση στήριξης στο μέτωπο δρα όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφα και ότι η ροή του υλικού μέσα στον ατέρμονα κοχλία είναι συνεχής. Αυτό αποτρέπει οποιαδήποτε παρεμπόδιση του τροχού κοπής ή έμφραξη του θαλάμου εκσκαφής σε περιοχές με χαμηλή βαθμίδα πίεσης. Επιπλέον, οι ροπές μετάδοσης κίνησης του τροχού κοπής και του ατέρμονα κοχλία παραμένουν εντός των οικονομικών ορίων. Εν τούτοις, η συνεκτικότητα της λάσπης δεν πρέπει να είναι πολύ μαλακή, ώστε να μπορεί να μεταφερθεί κατά μήκος της σήραγγας σε μεταφορικούς ιμάντες ή σε φορτηγά αυτοκίνητα. Προκειμένου να αποφευχθεί ανεξέλεγκτη ροή, κατά τη μεταφορά της λάσπης, από τον ατέρμονα κοχλία στο μεταφορικό ιμάντα χωρίς υδροφράχτη, η λάσπη πρέπει να έχει χαμηλή διαπερατότητα και επαρκή συνεκτικότητα. Η διαδικασία βελτίωσης επηρεάζεται από τις παραμέτρους της γεωμάζας: (α) κοκκομετρική διαβάθμιση, (β) φυσική υγρασία, (γ) όριο υδαρότητας, (δ) δείκτης πλαστικότητας, και (ε) δείκτης υδαρότητας. Οι παράμετροι μπορούν να επηρεαστούν από την προσθήκη νερού, μπεντονίτη, αργίλου ή πολυμερών εναιωρημάτων, και αφρού. Η βελτίωση της εκσκαμμένης γεωμάζας θα πρέπει να πραγματοποιείται άμεσα στο μέτωπο μπροστά από τον τροχό κοπής, προκειμένου να αποφεύγεται η προσκόλληση της στον τροχό κοπής και στα ανοίγματα.

8.3.3.2 Κοκκομετρική διαβάθμιση υλικού εκσκαφής

Οι ασπίδες με στήριξη πίεσης λάσπης είναι ιδιαίτερα κατάλληλες για εδάφη με περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα (<0.06 mm) πάνω από 30%. Σε αδρόκοκκα και μεικτής σύνθεσης εδάφη και πετρώματα, η ενεργός τάση της γεωμάζας στο θάλαμο και η ροπή στρέψης του τροχού κοπής αυξάνονται δυσανάλογα με την αύξηση της πίεσης στήριξης. Οι ροϊκές ιδιότητες του υλικού εκσκαφής μπορεί να βελτιωθούν με την προσθήκη κατάλληλου μαλακτικού, όπως μπεντονίτης, πολυμερές ή αφρός. Ιδανικά για διάνοιξη από τη μηχανή είναι τα ιλυοαργιλώδη έως ιλυοαμμώδη εδάφη. Ανάλογα με την κατάσταση των εδαφών που απαντώνται, απαιτείται προσθήκη μικρής ή καθόλου ποσότητας νερού. Η μηχανική δράση των αναδευτήρων στο θάλαμο εκσκαφής μπορεί να μετατρέψει ακόμα και πολύ συνεκτικά εδάφη σε πλαστικό πολτό, χωρίς την προσθήκη οποιουδήποτε παράγοντα βελτίωσης. Με την αύξηση της περιεκτικότητας των αδροκόκκων, η προσθήκη νερού μόνο δεν αρκεί. Η γωνία εσωτερικής τριβής δεν μειώνεται, ενώ υπάρχει ο κίνδυνος διαχωρισμού. Η αυξημένη διαπερατότητα καθιστά τη σφράγιση του ατέρμονα κοχλία προβληματική. Με την προσθήκη αργίλου, ή εναιωρήματος μπεντονίτη, αυξάνεται η περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα και περιορίζεται (κλειδώνεται) το νερό των πόρων, με αποτέλεσμα τη διόγκωση της λάσπης η οποία μετατρέπεται σε υλικό με καλές ροϊκές ιδιότητες και μειωμένη διαπερατότητα. Καλά αποτελέσματα μπορεί επίσης να επιτευχθούν με έγχυση ενός ισχυρά υδρόφιλου πολυμερούς εναιωρήματος. Όλο το φάσμα εφαρμογής των ασπίδων αντιστάθμισης της εδαφικής πίεσης φαίνεται στο Σχήμα 8-22.



Σχήμα 8-22. Επιλογή σύμφωνα με την κοκκομετρική διαβάθμιση και την περατότητα

Πάνω από την ευρεία καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης (1) με ελάχιστη περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα 30%, τα εδάφη είναι κατ' εξοχήν αδιαπέρατα από το νερό με τη συνεκτικότητα να καθορίζεται από την περιεκτικότητα τους σε νερό. Όταν το έδαφος είναι ημιστερεό (CI>1) και έχει υψηλή συνοχή και χαμηλή διαπερατότητα, είναι γενικά δυνατή η διάνοιξη χωρίς υποστήριξη. Αν ωστόσο απαιτείται υποστήριξη, τότε η συνεκτικότητα του εδάφους θα πρέπει να είναι μαλακή (CI=0.40÷0.75). Ανάλογα με την ορυκτολογική σύσταση, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βελτιωτικοί παράγοντες νερό και χαμηλού ιξώδους εναιωρήματα όπως μπεντονίτης ή πολυμερή, ή αφρός. Κάτω από την καμπύλη διαβάθμισης (1), η διαπερατότητα του νερού και οι εσωτερικές τριβές του υλικού αυξάνονται αισθητά. Τα όρια εφαρμογής καθορίζονται από τον συντελεστή διαπερατότητας και την επικρατούσα πίεση των υπογείων υδάτων, που πρακτικά δεν πρέπει να υπερβαίνουν τα 10^{-5} m/s και τα 2 bar, αντίστοιχα. Η οριακή καμπύλη (2) αντιστοιχεί στο όριο αυτό της διαπερατότητας. Στην περιοχή μεταξύ των καμπυλών (2) και (3), η ασπίδα αντιστάθμισης με λάσπη δεν πρέπει να χρησιμοποιείται σε συνθήκες πίεσης υπόγειων υδάτων. Οι μόνοι κατάλληλοι ρυθμιστικοί παράγοντες για τα εδάφη κάτω από την καμπύλη διαβάθμισης (2) είναι τα υψηλού ιξώδους εναιωρήματα αργίλου ή αφροί πολυμερών. Εάν η υγρή αναλογία του βελτιωτικού παράγοντα υπερβαίνει το 40 έως 45% του όγκου εκσκαφής, τότε το αποκομιζόμενο υλικό είναι ρευστής συνεκτικότητας και ο ιμάντας μεταφοράς πρέπει να αντικαθίσταται από υδραυλική μεταφορά. Κάτω από την καμπύλη διαβάθμισης (3), η διαπερατότητα είναι πολύ υψηλή και η χρήση μαλακτικού παράγοντα δεν έχει καμία επίδραση επειδή στραγγίζει ανεμπόδιστα μπροστά από το μέτωπο και δεν είναι δυνατόν να δημιουργηθεί οποιαδήποτε πίεση υποστήριξης. Η διάμετρος και το ποσοστό λίθων πρέπει επίσης να είναι περιορισμένα, καθόσον δεν μπορεί να τοποθετηθεί θραυστήρας πετρωμάτων στο εσωτερικό του θαλάμου εκσκαφής, με αποτέλεσμα να κινδυνεύει ο ατέρμων κοχλίας να υποστεί βλάβη.

8.3.3.3 Στήριξη μετώπου και απομάκρυνση υλικού εκσκαφής

Πλεονέκτημα των EPBS είναι η ευελιξία τους, να λειτουργούν με πέντε διαφορετικούς τρόπους (Maidl, 2012), που διαφέρουν στη στήριξη του μετώπου και στη μεταφορά των υλικών εκσκαφής.

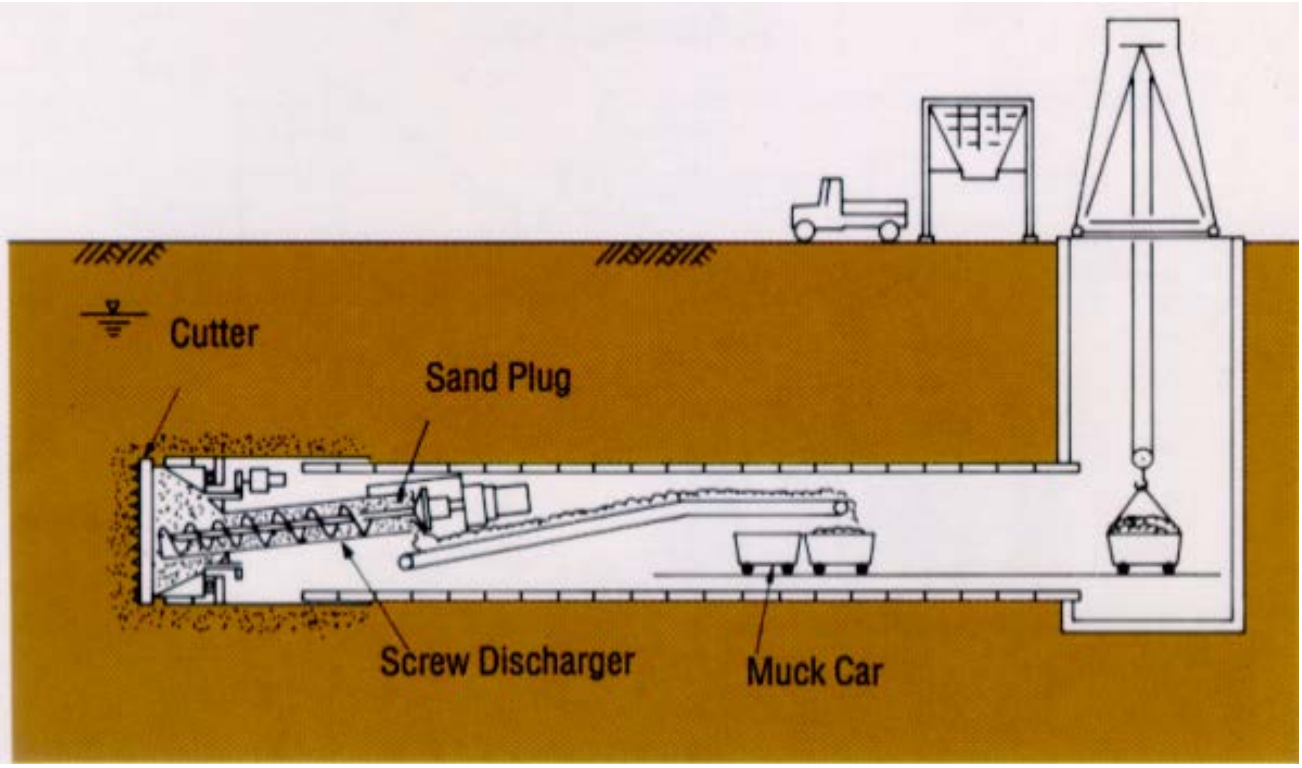
Λειτουργία με ανοιχτό μέτωπο, δηλαδή χωρίς αντίσταση στην εδαφική πίεση και στην πίεση του νερού, είναι δυνατή όταν το έδαφος έχει επαρκή χρόνο ευστάθειας και όχι υπερβολική εισροή νερού κατά την προχώρηση. Ο ατέρμων κοχλίας αδρανοποιείται, και ο ιμάντας μεταφοράς τοποθετείται στο κέντρο του τροχού κοπής ώστε η απομάκρυνση των υλικών εκσκαφής να γίνεται άμεσα σε αυτόν. Η κοπτική κεφαλή κατασκευάζεται συχνά ως ένα περιστρεφόμενο τύμπανο και είναι εφοδιασμένη με πτύα ανάληψης του υλικού εκσκαφής. Το εκσκαπτόμενο πέτρωμα τότε πέφτει λόγω βαρύτητας μέσω μιας χοάνης στο κέντρο επί ενός μεταφορικού ιμάντα. Ωστόσο, η κατασκευή της κοπτικής κεφαλής ως ένα τύμπανο δυσκολεύει τη βελτίωση των υλικών εκσκαφής. Μετατροπή του συστήματος αποκόμισης των υλικών έξω από τον θάλαμο εκσκαφής, σε σύστημα με ατέρμονα μεταφορικό κοχλία είναι δυνατή, αν και χρονοβόρα. Ωστόσο, προϋπόθεση σε αυτή την περίπτωση είναι η πολύ καλή πλασιμότητα του εδάφους, η οποία συχνά δεν επιτυγχάνεται.

Σε βράχο ή ευσταθές έδαφος τα EPBS δύνανται να εργάζονται με ανοικτό μέτωπο και η απομάκρυνση των υλικών εκσκαφής να πραγματοποιείται από μεταφορικό κοχλία. Ο τροχός κοπής μπορεί να εξοπλίζεται με δίσκους και αποξεστήρες. Σε υδροφόρες ζώνες δύναται να εφαρμόζεται πιεσμένος αέρας στο θάλαμο εκσκαφής κατά την διάρκεια διακοπών, μετά από κλείσιμο της βάνας του κοχλία μεταφοράς. Για την απομάκρυνση των υλικών εκσκαφής απαιτούνται μέτρα προστασίας έναντι φθοράς, του κοχλία, του τροχού κοπής και των κοπτικών.

Σε προσωρινά σταθερό έδαφος με εισροή νερού, η ασπίδα μπορεί να λειτουργεί ημιανοικτά, με κλειστό μέτωπο και μερικό υποβιβασμό της λάσπης στο θάλαμο εκσκαφής. Το ανώτερο τμήμα γεμίζεται με πιεσμένο αέρα, έτσι ώστε το νερό σε διακλάσεις και πόρους να εκτοπίζεται και η εισροή νερού να μειώνεται. Αυτή η διαδικασία μπορεί εν τούτοις να οδηγήσει σε ανεξέλεγκτες εκτινάξεις μέσα από τον κοχλία μεταφοράς. Επαρκής σφράγιση εξασφαλίζεται μόνο από αργίλους ή ισχυρά αποσαθρωμένο πέτρωμα, στα οποία όμως, δίχως τη βελτίωση με αφρό, ο κίνδυνος προσκόλλησης και βαριάς φθοράς, είναι αναμενόμενος.

Ο κίνδυνος εκτίναξης στην έξοδο του κοχλία μπορεί να αποφευχθεί με τη σύνδεση ενός κλειστού υδραυλικού συστήματος μεταφοράς. Ο τροχός κοπής και ο μεταφορικός κοχλίας πρέπει να ταιριάζονται μεταξύ τους σύμφωνα με την αντοχή, αποξεστικότητα και κοπτικότητα του πετρώματος. Επίσης, η δυνατότητα άντλησης απαιτεί να υπάρχουν κυλινδρικοί θραυστήρες στη διεπαφή του μεταφορικού κοχλία και της αντλίας μεταφοράς.

Η ασπίδα εφόσον χρησιμοποιείται σε βράχο, με απομάκρυνση των υλικών εκσκαφής από κοχλία μεταφοράς σε ιμάντα μεταφοράς, για να λειτουργήσει ως EPB απαιτεί εξαιρετικά περίπλοκη χρήση βελτιωτικών παραγόντων, λόγω της ανεπαρκούς πλασιμότητας των υλικών. Για το λόγο αυτό, η μεταφορά και απόρριψη της γεωμάζας πρέπει να σχεδιάζεται προσεκτικά εξ αρχής από κοινού με τη μελέτη στήριξης του μετώπου.



Σχήμα 8-23. Αποκόμιση των προϊόντων της εκσκαφής ασπίδων αντισταθμιστικής πίεσης εδάφους

8.3.3.4 Τροχός κοπής

Ο τροχός κοπής πρέπει να εκσκάπτει τη γεωμάζα από το μέτωπο και να την αναζυμώνει στο θάλαμο εκσκαφής καθώς περιστρέφεται ώστε να την μετατρέπει σε πλάσιμο υλικό. Επειδή η γεωμάζα πρέπει να βελτιώνεται κατά τη διάρκεια της εκσκαφής από το μέτωπο, τα ακροφύσια για την προσθήκη των κατάλληλων παραγόντων θα πρέπει να βρίσκονται μπροστά από τον τροχό κοπής. Το μέγεθος των ανοιγμάτων στον τροχό κοπής ως ποσοστό της επιφάνειάς του μπορεί να επιλέγεται λαμβάνοντας υπόψη τη δομητική ικανότητα του. Ένας ανοιχτός τροχός κοπής (αστέρας) πλεονεκτεί σε σχέση με έναν κλειστό, στο ότι ο κίνδυνος προσκόλλησης είναι σημαντικά μικρότερος, η κατανομή της πίεσης στήριξης στο μέτωπο πιο ομοιόμορφη και η ροή προς τον κοχλία μεταφοράς ομαλότερη. Από την άλλη, ανάλογα με τον τύπο του εδάφους, μειονεκτεί στον αυξημένο κίνδυνο εργασίας στο θάλαμο εκσκαφής κάτω από πιεσμένο αέρα λόγω της έλλειψης μηχανικής στήριξης, στον αυξημένο κίνδυνο καθιζήσεων εκεί όπου η σήραγγα είναι ρηχή, και στο ότι ο τροχός κοπής είναι λιγότερο δύσκαμπτος. Τη στιβαρότητα του τροχού κοπής μπορεί να βελτιώσει η ενσωμάτωση στεφάνης περιβάλλουσας

τον ανοικτό αστέρα. Οι ελεύθερες περιοχές μεταξύ των βραχιόνων του τροχού κοπής μπορούν να κλείνουν από υδραυλικά κινούμενα φύλλα στήριξης του μετώπου. Όμως, οι κατασκευές αυτές εκτίθενται σε υψηλό κίνδυνο φθοράς από την αποξεστικότητα του πετρώματος και την υψηλή πίεση στήριξης. Δεδομένου ότι η απομάκρυνση των λίθων που σφηνώνονται στον μεταφορικό κοχλία είναι εξαιρετικά δύσκολη, οι κατασκευαστές τείνουν να κατασκευάζουν κλειστούς τροχούς κοπής.

Οι κλειστοί τροχοί κοπής προσφέρουν περιορισμένη προστασία στο προσωπικό που εισέρχεται στο χώρο εκσκαφής για να προβαίνει σε απαραίτητες εργασίες, ιδιαίτερα σε συνθήκες πιεσμένου αέρα, επειδή δεν υφίσταται σφράγιση τυχόν ρέουσας γεωμάζας του μετώπου, σε αντίθεση με μια ασπίδα πολφού. Κλειστοί τροχοί κοπής ή τύμπανα χρησιμοποιούνται σε σχηματισμούς με αστάθεια μετώπου για την αποτροπή της χαλάρωσης της γεωμάζας στο μέτωπο. Μειονέκτημα του κλειστού τροχού κοπής είναι η λιγότερο ομοιόμορφη κατανομή της πίεσης στήριξης στο μέτωπο. Η πίεση στο διάφραγμα δεν συμφωνεί πάντα με την εδαφική πίεση στο μέτωπο και εξαρτάται επίσης με τη θέση του τροχού κοπής και την κατεύθυνση περιστροφής του. Τα αναφερθέντα προβλήματα με κλειστούς τροχούς κοπής μπορούν πλέον να αντιμετωπισθούν με χρήση αφρού. Ο τροχός κοπής μπορεί να είναι εφοδιασμένος με αποξεστήρες, και δίσκους ανάλογα με τις γεωλογικές συνθήκες. Προσοχή πρέπει να δίνεται στην επαρκή προστασία έναντι φθοράς, ιδιαίτερα σε αποξεστικό έδαφος. Η απαιτούμενη ροπή στρέψης του τροχού κοπής αυξάνεται εκθετικά με την αύξηση της διαμέτρου. Μείωση της ροπής στρέψης επιτυγχάνεται με τη χρήση δύο τροχών κοπής που περιστρέφονται σε αντίθετες κατευθύνσεις.

8.3.3.5 Σύστημα περιστροφής της κεφαλής

Η δυνατότητα πρόσβασης και τα συστήματα σφράγισης του εφεδράνου είναι κρίσιμα, επειδή υπόκεινται σε ακραίες μηχανικές δράσεις σε αποξεστικές γεωμάζες στις οποίες η λάσπη είναι λειαντική. Οι ασπίδες EPB κατασκευάζονται σε τρεις διαφορετικές διατάξεις του συστήματος περιστροφής και του εφεδράνου (Maidl, 2012), ήτοι: (α) με τροχό κοπής και κεντρικό σύστημα περιστροφής, (β) με τροχό κοπής και θάλαμο εκσκαφής να σχηματίζουν μία μονάδα που περιστρέφεται από κοινού και τα έδρανα και η μονάδα περιστροφής να είναι στην περίμετρο του τυμπάνου, και (γ) με τροχό κοπής χωρίς κεντρικό σύστημα περιστροφής, με τη διάμετρο του κύριου εφεδράνου κίνησης να είναι περίπου το ήμισυ της διαμέτρου της ασπίδας. Η τελευταία διάταξη συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των δύο προηγουμένων διατάξεων, ενώ επίσης οι δοκοί στήριξης της κεφαλής βοηθούν στην περαιτέρω αναζύμωση της λάσπης. Ο σχεδιασμός του θαλάμου εκσκαφής καθορίζεται ουσιαστικά από τη θέση του κοχλία μεταφοράς, τη θέση της ανθρωποθυρίδας, και το είδος τροχού κοπής. Κίνδυνος προσκόλλησης υπάρχει αυξημένος στο κέντρο του θαλάμου εκσκαφής, καθώς εκεί μειώνεται η ταχύτητα των περιστρεφόμενων εργαλείων αναζύμωσης.

8.3.3.6 Ατέρμων κοχλίας μεταφοράς

Ο μεταφορικός κοχλίας πρέπει να μπορεί να: (α) μεταφέρει συνεχώς τη λάσπη έξω από τον υπό πίεση θάλαμο εκσκαφής, σε ατμοσφαιρική πίεση, (β) σφραγίζει έναντι εισροής υπόγειου νερού υπό πίεση σε διαπερατά εδάφη, και (γ) ελέγχει την πίεση υποστήριξης στο θάλαμο εκσκαφής με την ελεγχόμενη απομάκρυνση υλικού. Αποτελείται από έναν περιστρεφόμενο έλικα μέσα σε ένα σταθερό περίβλημα. Ο έλικας κανονικά είναι στερεωμένος σε ένα άξονα περιστροφής, αλλά μπορεί επίσης να κατασκευασθεί χωρίς κεντρική άτρακτο, έτσι ώστε να μπορούν να μεταφερθούν μεγαλύτερες πέτρες μέσα από το κέντρο του.

Η μονάδα περιστροφής μπορεί να είναι είτε κεντρική είτε περιφερειακή. Εφόσον η μονάδα είναι κεντρική, η λάσπη μεταφέρεται μέσα από μία κατώτερη είσοδο κλείστρου, ενώ εάν η μονάδα είναι περιφερειακή η λάσπη δύναται να απομακρύνεται άμεσα από το άκρο του περιβλήματος.

Μεταφορικοί κοχλίες με χαμηλά την είσοδο έχουν αποδειχθεί επιτυχείς, καθόσον η λάσπη υποβοηθείται να κινηθεί προς την εισαγωγή από το ίδιο της βάρος. Σφράγιση έναντι των υπό πίεση υπόγειων υδάτων παρέχεται από διάφορα συστήματα (Maidl et al., 2012), όπως με βαλβίδα εξόδου, με περιστροφικό τροφοδότη ή χοάνη, με κοχλία δύο σταδίων στη σειρά ή ο ένας δίπλα στον άλλο. Σε ιλυώδη και αμμώδη εδάφη, η τεχνικά απλή βαλβίδα εξόδου έχει αποδειχθεί επιτυχής, αλλά με την αύξηση του μεγέθους των κόκκων και την αύξηση της διαπερατότητας του νερού, το σύστημα δεν προσφέρει πλέον ικανοποιητική λύση. Το κύριο πρόβλημα με τον περιστροφικό τροφοδότη είναι ο αυξημένος κίνδυνος προσκόλλησης και απόφραξης. Το σύστημα σφράγισης λειτουργεί με την αρχή της συμπύκνωσης της λάσπης εντός του περιβλήματος. Με την αύξηση της πυκνότητας, διαμορφώνεται ένα πώμα χαμηλής διαπερατότητας που εμποδίζει την είσοδο νερού από τον θάλαμο εκσκαφής. Ο σχηματισμός του πώματος σφράγισης πρέπει να λαμβάνει χώρα σε μία καθορισμένη θέση, και αυτή δεν πρέπει να είναι ακριβώς δίπλα στο άνοιγμα εκκένωσης της λάσπης.

Αισθητήρες πίεσης επιτρέπουν στο χειριστή του TBM την εκτίμηση του βαθμού συμπύκνωσης της λάσπης στο μεταφορικό κοχλία. Η ποσότητα των προϊόντων της εκσκαφής μετρείται, μετά την έξοδο από τον κοχλία, στον ιμάντα μεταφοράς, είτε με ζυγούς ως βάρος είτε με υπερήχους ή laser ως όγκος, για δεδομένη ταχύτητα του ιμάντα.

8.3.3.7 Παράγοντες βελτίωσης υλικού εκσκαφής

Η απλούστερη λειτουργία των EPBS δεν χρησιμοποιεί πρόσθετα, και βρίσκει εφαρμογή στη διάνοιξη μαλακών εδαφών, όπως οι άργιλοι, οι αμμώδεις άργιλοι, και οι ιλύες, περιορισμένης ευστάθειας, παρουσία υπογείων υδάτων. Εφόσον τα εκσκαπτόμενα εδάφη είναι μη πλάσιμα, όπως τα αμμώδη, τότε προστίθεται σε αυτά κάποιο πρόσθετο είτε υψηλής πυκνότητας άργιλος είτε αφρός για να τους προσδώσει ρευστότητα μέσα στο θάλαμο πίεσης και στον ατέρμονα κοχλία. Η χρήση αφρού δίνει τη δυνατότητα σημαντικής επέκτασης του πεδίου εφαρμογής των μηχανών EPB. Ο αφρός παράγεται και εγχέεται σύμφωνα με ακριβείς συνθέσεις και παρακολουθείται από συστήματα ελέγχου. Το διάλυμα αφρού αναμιγνύεται με πιεσμένο αέρα σε μία γεννήτρια αφρού και εγχέεται διαμέσου ανοιγμάτων μπρος από τον τροχό κοπής ή μέσα στον θάλαμο εκσκαφής. Ο αφρός αναμιγνύεται με την εκσκαφθείσα γεωμάζα και καταλαμβάνει μόνιμη θέση στο σκελετό των κόκκων. Το διάλυμα αφρού αποτελείται από νερό με την προσθήκη μιας τασιενεργής ουσίας που ενεργεί ως παράγοντας αφρισμού και ένα πολυμερές που δρα ως σταθεροποιητής.

Οι φυσαλίδες αέρα στο σκελετό των κόκκων δημιουργούν μια χαμηλότερη πυκνότητα της λάσπης και μειώνουν την τριβή των κόκκων. Το μέτρο δυστροπίας του μίγματος της γεωμάζας μειώνεται σε τέτοιο βαθμό ώστε το έδαφος να έχει ιδανικές πλαστικές ιδιότητες σε ένα ευρύ φάσμα παραμόρφωσης, που επιτρέπει πολύ καλύτερο έλεγχο της πίεσης στήριξης στο πρόσωπο. Όταν η πίεση στον θάλαμο εκσκαφής πέφτει, η αέρια φάση στο σκελετό των κόκκων διαστέλλεται και το έδαφος εκτείνεται. Όταν η πίεση αυξάνεται, ο αέρας των κενών αρχικά συστέλλεται και η ξαφνική αύξηση της ροπής στρέψης της κοπτικής κεφαλής αποσβένεται αποτελεσματικά.

Η χρήση υψηλής υδατοαπορροφητικότητας πολυμερών ενεργών ανιόντων, περιβάλλει τα στερεά σωματίδια με ένα ολισθηρό στρώμα, και σχηματίζεται ένα συνεχές σύστημα τριών φάσεων. Το ελεύθερο νερό στους πόρους, με την έγχυση του αφρού μπροστά από τον τροχό κοπής, μετατοπίζεται από το σύστημα των πόρων ή προσροφάται από πολυμερή. Η διαπερατότητα του νεοσυσταθέντος τριφασικού συστήματος είναι σημαντικά μικρότερη από εκείνη της φυσικής μη διαταραγμένης γεωμάζας. Δεδομένου ότι μειώνεται η εσωτερική τριβή της γεωμάζας, όλα τα συστήματα κίνησης, όπως του τροχού κοπής, των εμβόλων ώσης και του μεταφορικού κοχλία, μπορεί να σχεδιαστούν οικονομικότερα. Εφόσον η σύσταση του αφρού είναι σωστή, η γεωμάζα εξακολουθεί να έχει συνεκτικότητα μέσω χημικών και φυσικών δυνάμεων σύνδεσης, και μπορεί να μεταφερθεί επί του ιμάντα μεταφοράς χωρίς προβλήματα. Το γεγονός ότι ο αφρός περιέχει συχνά πάνω από 90% αέρα, ο οποίος ξεφεύγει από τη λάσπη μετά από λίγες ημέρες ώστε αυτή να επιστρέφει στην αρχική της συνοχή, προσφέρει πλεονεκτήματα για την απόθεση ή ανακύκλωση των υλικών εκσκαφής, χωρίς να απαιτείται επίπονη και δαπανηρή μονάδα διαχωρισμού.

8.3.3.8 Εφαρμογές στην Ελάδα

8.3.3.8.1 Ασπίδες του Μετρό της Αθήνας

Στην περίπτωση του μετρό της Αθήνας χρησιμοποιήθηκαν αρχικά δύο ασπίδες EPB (Σχήμα 8-24) με χαρακτηριστικά καθεμιάς: *μήκος 140m, συνολικό βάρος 1650 τόνοι, και συνολική ισχύ 4000kW*. Αυτά προωθούνταν σε μήκος ~10m την ημέρα, κατασκευάζοντας αντίστοιχο μήκος περατωμένης σήραγγας διαμέτρου εκσκαφής 9.50m και εσωτερικής διαμέτρου 8.48m με επένδυση από προκατασκευασμένα τόξα σκυροδέματος.



Σχήμα 8-24. TBM-S5 του μετρό της Αθήνας: Μηχανή 1150t διαμέτρου 9460mm διάνοιξης τμήματος της γραμμής 3 – Η κοπτική κεφαλή έχει 190 δόντια, 32 κάδους, και 20 δίδυμους κοπτικούς δίσκους 17" ÷ 20". Υδραυλικοί κινητήρες προσφέρουν ισχύ 2400kW στην κοπτική κεφαλή.

8.3.3.8.2 Ασπίδες του Μετρό της Θεσσαλονίκης

Το δίκτυο του μετρό της Θεσσαλονίκης είναι παρόμοιο με το Μετρό της Κοπεγχάγης και τη γραμμή μετρό Docklands του Λονδίνου. Αποτελείται από δυο ανεξάρτητες σήραγγες μονής τροχιάς και διαθέτει σταθμούς με κεντρική αποβάθρα, με συστήματα αυτόματων θυρών στις αποβάθρες. Κατασκευάζεται από δύο ασπίδες (Έλλη και Φρίξος), κρατώντας αποστάσεις ασφαλείας η δεύτερη από την πρώτη. Η κάθε ασπίδα επιτυγχάνει ρυθμούς προχώρησης της τάξης των 20m/ημέρα. Στο Σχήμα 8-25, παρατηρούμε την έξοδο από το σταθμό με ώθηση επί χαλύβδινου πλαισίου και επένδυσης κατασκευασμένης εκτός της σήραγγας.



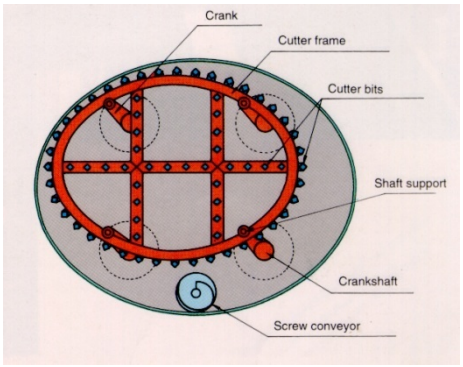
Σχήμα 8-25. Ασπίδα του μετρό της Θεσσαλονίκης

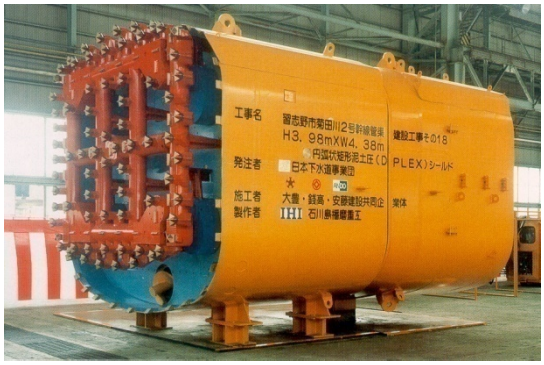
8.3.4 Μικτή Μετατρεπόμενου Τύπου Ασπίδα «KSM»

Όταν οι αναμενόμενες γεωλογικές συνθήκες μεταβάλλονται, συχνά απαιτείται η αλλαγή του τρόπου στήριξης του μετώπου. Ορισμένοι τύποι ασπίδων επιτρέπουν τη λειτουργία τους με περισσότερους από έναν από τους παραπάνω τύπους στήριξης του μετώπου, και απομάκρυνσης (*Σχήμα 8-13*) των προϊόντων της εκσκαφής, ώστε με την αλλαγή της μεθόδου εκσκαφής η ασπίδα να μπορεί να αντεπεξέλθει επιτυχώς σε διαφορετικές συνθήκες εδάφους και υπόγειων υδάτων. Η μετατρεπόμενου τύπου ασπίδα κατασκευάσθηκε από τις γερμανικές εταιρείες "Wayss, Freytag" και "Herrenknecht" και λειτουργεί ως EPB, ως υδροασπίδα πολφού (slurry) και ως ασπίδα με υποστήριξη μετώπου με εφαρμογή πεπιεσμένου αέρα (Maidl, 1994). Η αλλαγή του τρόπου λειτουργίας από EPB σε Μηχάνημα Πολφού απαιτεί μηχανολογικές παρεμβάσεις οι οποίες διαρκούν από μία έως δύο ημέρες. Η αλλαγή του τρόπου λειτουργίας απαιτεί την παύση του μηχανήματος. Η ασπίδα Mixshield (*Σχήμα 8-17*) π.χ., έχει τη δυνατότητα να μετατρέπεται σε EPBM και σε ασπίδα πιεσμένου αέρα.

8.4 Ασπίδες ολομέτωπης μη κυκλικής κοπής

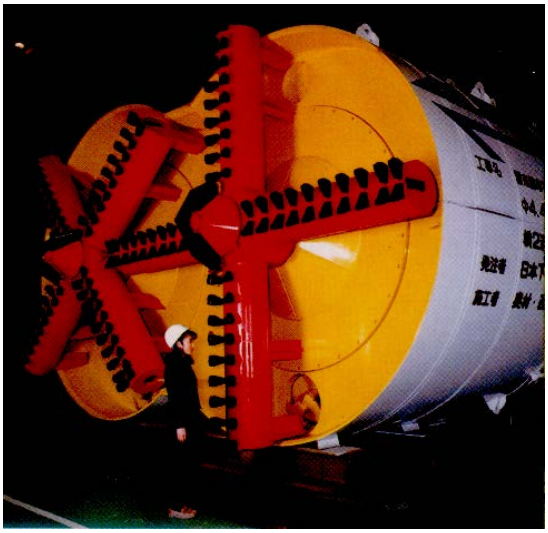
Οι ασπίδες διανοίγουν γενικά σήραγγες κυκλικής διατομής. Μολονότι η διατομή αυτή πλεονεκτεί στην ανάληψη των εσωτερικών και εξωτερικών πιέσεων, ειδικοί λόγοι μπορεί να απαιτούν άλλες μορφές διατομής. Το Σχήμα 8-26 παρουσιάζει δύο ασπίδες που δύνανται να πραγματοποιούν ολομέτωπη εκσκαφή και να διανοίγουν σήραγγες ελλειπτικής και ορθογωνικής διατομής.

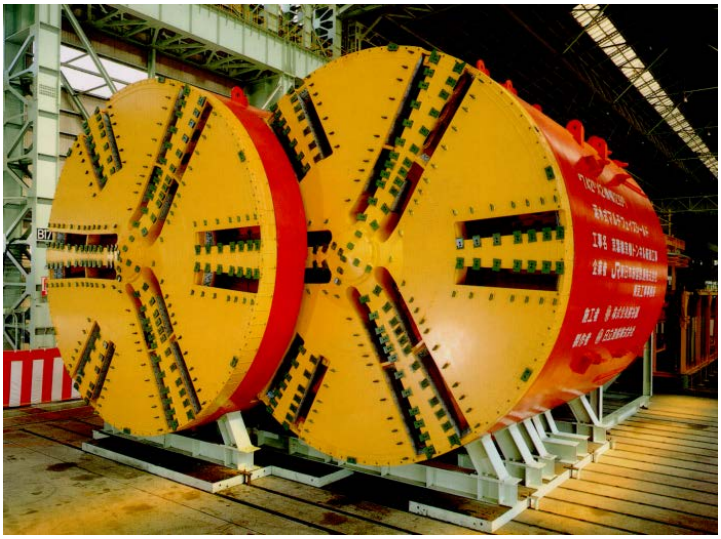




Σχήμα 8-26. Αριστερά: Κοπτική κεφαλή ελλειπτικής ασπίδας. Δεξιά: Ορθογωνική ασπίδα

Διατομές διπλού Ο (DOT) επιτυγχάνονται με τη χρήση εκμηχανισμένων ασπίδων πολλαπλών κεφαλών (Σχήμα 8-27). Οι μηχανές αυτές είναι κατάλληλες για τη διάνοιξη σιδηροδρομικών σηράγγων δύο τροχιών καθώς και οδικών σηράγγων πολλαπλών λωρίδων. Οι μηχανές μάλιστα αυτές, όταν απαιτείται, δύνανται να στρέφονται περί τον άξονα διάνοιξης, και να διανοίγουν υπόγειους διαδρόμους σύμφωνα με τις συγκοινωνιακές απαιτήσεις. Οι σιδηρόδρομοι επίσης απαιτούν συχνά στις σήραγγες το ύψος τους να είναι δυο φορές το πλάτος τους, ώστε να επιτρέπεται η διέλευση ειδικών εμπορευματικών αμαξοστοιχιών. Τέτοιες σήραγγες έχουν κατασκευαστεί με τη διάνοιξη πρώτα της αψίδας της σήραγγας με TBM και σε επόμενο στάδιο της κάτω ημιδιατομής με τη μέθοδο διάτρηση-ανατίναξη.





Σχήμα 8-27. Ασπίδα πολλαπλών περιστρεφόμενων κεφαλών (DOT)

8.5 Επιλογή της κατάλληλης ασπίδας

Η επιλογή της κατάλληλης μηχανής εξαρτάται πρωταρχικά από τον τύπο της γεωμάζας (Guglielmetti, et al., 2008), όπως φαίνεται και στο Σχήμα 8-11, και την ύπαρξη νερού. Στο *Σχήμα 8-28* δίνονται οι γενικές οδηγίες της DAUB, καταλληλότητας μιας μηχανής, για την αναμενόμενη συμπεριφορά της γεωμάζας και την ύπαρξη νερού.

Geotechnische Kennwerte / Geotechnical Parameters	Baugrund / Subsoil	Fels/Festgestein/Hard rock/soil: standfest bis nachbrüchig (competent to caving in)	Fels/Festgestein/Hard rock/soil: nachbrüchig bis gebräch (caving in to unstable)	Boden/Lockergestein/Soft rock/soil: bindig standfest (cohesive stable)	Boden/Lockergestein/Soft rock/soil: bindig nicht standfest (cohesive not stable)	Boden/Lockergestein/Soft rock/soil: Wechsellagerung (mixed conditions)	Boden/Lockergestein/Soft rock/soil: nicht bindig (non-cohesive)
Gesteinsfestigkeit σ D [MN/m²] / Rock Compressive strength		300 bis 50	50 bis 5	1,0	0,1		
Zugfestigkeit σz [MN|m²] / Tensile strength		25 bis 5	5 bis 0,5				
RQD-Wert RQD [%] / RQD value		100 bis 50	50 bis 10				
Kluftabstand [m] / Fissure spacing		> 2,0 bis 0,6	0,6 bis 0,06				
Kohäsion Cu [kN|m²] / Cohesion				≥ 30	30 bis 5	30 bis 5	
Kornverteilung < 0,02 [%] / Grain distribution < 0,06 [5]				30 ≥ 30	30 ≥ 30		10
TBM / TBM	o.W. / m.W.						
TBM-S mit Schild / TBM-S with shield	o.W. / m.W.						
SM-V1 ohne Stützung / SM-V1 without support	o.W. / m.W.						
SM-V2 mechan. Stützung / SM-V2 mech. support	o.W. / m.W.						
SM-V3 mit Druckluft / SM-V3 with compressed air	o.W. / m.W.						
SM-V4 Flüssigkeitsstützung / SM-V4 fluid support	o.W. / m.W.						
SM-V5 Erddruck-Stützung / SM-V5 earth pressure balance support	o.W. / m.W.						
SM-T1 ohne Stützung / SM-T1 without support	o.W. / m.W.						
SM-T2 Teilstützung / SM-T2 partial support	o.W. / m.W.						
SM-T3 mit Druckluft / SM-T3 with compressed air	o.W. / m.W.						
SM-T4 Flüssigkeitsstützung / SM-T4 fluid support	o.W. / m.W.						
Abbauwerkzeug / Extraction tool	V	rollend (Diskenmeißel) *rolling (cutter disc)*	rollend (Diskenmeißel) *rolling (disc bit)*	schälend (Flachmeißel) *stripping (flat bit)*	schälend (Flachmeißel) *stripping (chisel)*	lösend/schälend (Stichel/Flachmeißel) *loosening/stripping (cutter/flat bit)*	lösend (Stichel) *loosening (pick)*
	T	ritzend (Spitzmeißel) *notching (pick)*	ritzend (Spitzmeißel) *notching (point bit)*	ritzend (Spitzmeißel) *notching (point bit)*	schälend (Flachmeißel) *stripping (flat bit)*	schälend (Flachmeißel) *stripping (flat bit)*	lösend (Stichel) *loosening (pick)*

o.W. = ohne Grund- bzw. Schichtwasser */without groundwater or underground water*
m.W. = mit Grund- bzw. Schichtwasser */with groundwater or underground water*
Haupteinsatzbereich/*Main field of application*
Einsatz möglich/*application possible*

Σχήμα 8-28. Εύρη εφαρμογής των μηχανών διάτρησης σηράγγων με βάση τη συμπεριφορά της γεωμάζας και την ύπαρξη νερού (DAUB, 1997).

8.6 Ώση και ροπή μηχανών κλειστού μετώπου

Οι ασπίδες που λειτουργούν με κλειστό μέτωπο έχουν ιδιαίτερες απαιτήσεις ώσης και ροπής στρέψης. Ως εκ τούτου θα πρέπει να εκτιμώνται ορθά οι απαιτήσεις αυτές, έτσι ώστε οι μηχανές να είναι αφενός μεν επαρκείς, αφετέρου δε οικονομικά συμφέρουσες.

8.6.1 Ώση

Η απαιτούμενη ώση F_T (Wittke, 2007) για μια ασπίδα κλειστού μετώπου μπορεί γενικά να υπολογιστεί ως το άθροισμα της ώσης των κοπτικών F_C, της ώσης F_S λόγω της ασκούμενης πίεσης στήριξης του μετώπου, της αντίστασης F_F τριβής της ασπίδας με το έδαφος, F_G της έλξης του συρμού εξυπηρέτησης, και ενός περιθωρίου ασφαλείας ΔF που περιλαμβάνει αντιστάσεις λόγω καθοδήγησης σε καμπύλες τροχιές, τριβής μεταξύ σφράγισης ασπίδας στην ουρά και στοιχείων της επένδυσης, εκκίνησης, κλπ.

$$F_T = F_C + F_S + F_F + F_G + \Delta F$$

(8-1)

8.6.1.1 Διείσδυση κοπτικών δίσκων

Η απαιτούμενη δύναμη ώσης F_C υπολογίζεται (βλ. ενότητα 7.3.1) ως το άθροισμα της ώσης των κοπτικών δίσκων (Roxborough & Phillips, 1975), σύμφωνα με την:

$$F_C = \sum_{i=1}^{n_d} F_{ci}\,; \forall F_{ci} = F_c \Rightarrow F_C = n_d \cdot F_c;\; F_c = 4 \cdot \sigma_{ci} \cdot tan\frac{\alpha_d}{2} \cdot \delta_p \cdot \sqrt{d_d \cdot \delta_p - \delta_p^2}$$

(8-2)

όπου, n_d: αριθμός κοπτικών δίσκων, F_{ci}: ώση δίσκου i, F_c: θεωρούμενη κοινή τιμή ώσης για όλους τους κοπτικούς δίσκους, δ_p: διείσδυση κοπτικού δίσκου στο πέτρωμα, d_d: διάμετρος κοπτικού δίσκου, α_d: γωνία αιχμής δίσκου, σ_{ci}: μονοαξονική αντοχή του πετρώματος.

8.6.1.2 Πίεση μετώπου

Η αντίσταση F_S, λόγω της πίεσης p_s στήριξης του μετώπου, δίνεται από την:

$$F_S = \int_{A_H} p_s \cdot dA = \frac{\pi \cdot D_H^2}{4} \cdot p_{S,mean}$$

(8-3)

όπου A_H το εμβαδόν του μετώπου, D_H η διάμετρος εκσκαφής, και p_{Smean} μια μέση πίεση στο μέτωπο, η οποία πρέπει να είναι μεταξύ ενεργητικής και παθητικής.

8.6.1.3 Τριβή μεταξύ μηχανής και εδάφους

Εφόσον κατά τη διάνοιξη η διατομή παραμένει ευσταθής, η αντίσταση τριβής οφείλεται στην ολίσθηση της ασπίδας στην περιοχή του αναστρόφου, και υπολογίζεται όπως και στην ενότητα 7.3.1. Αντίθετα, αν η γεωμάζα είναι συνθλίβουσα, η ασπίδα θα έρθει σε πλήρη επαφή με αυτήν. Η αντίσταση τριβής προκύπτει τότε ως το ολοκλήρωμα των αντιστάσεων τριβής στην επιφάνεια της ασπίδας λόγω της ασκούμενης ακτινικής πίεσης σ_r. Εφόσον, στην ακραία περίπτωση, η ασκούμενη πίεση στην ασπίδα φτάσει τις τιμές το φυσικού εντατικού πεδίου, τότε:

$$F_F = \mu_f \cdot \iint_{0,0}^{2\pi,L_S} \sigma_r \cdot \frac{D_s}{2} \cdot d\theta \cdot dL = \mu_f \cdot \left\{[2 \cdot p_V + K_o \cdot (2 \cdot p_V + D_s \cdot \gamma')] \cdot D_s \cdot L_s + \left(W_{EPBnt} - W_{EPBby}\right)\right\}$$

(8-4)

όπου, μ_f: συντελεστής τριβής, W_{EPBnt}: βάρος μηχανής, W_{EPBby}: άνωση μηχανής, p_V: η κατακόρυφη ενεργός πίεση του υπερκειμένου εδάφους που ασκείται στη στέψη της ασπίδας, K_o: ουδέτερη ώθηση γαιών, D_s: διάμετρος ασπίδας, L_s: μήκος ασπίδας, γ': μοναδιαίο βάρος εδάφους υπό άνωση.

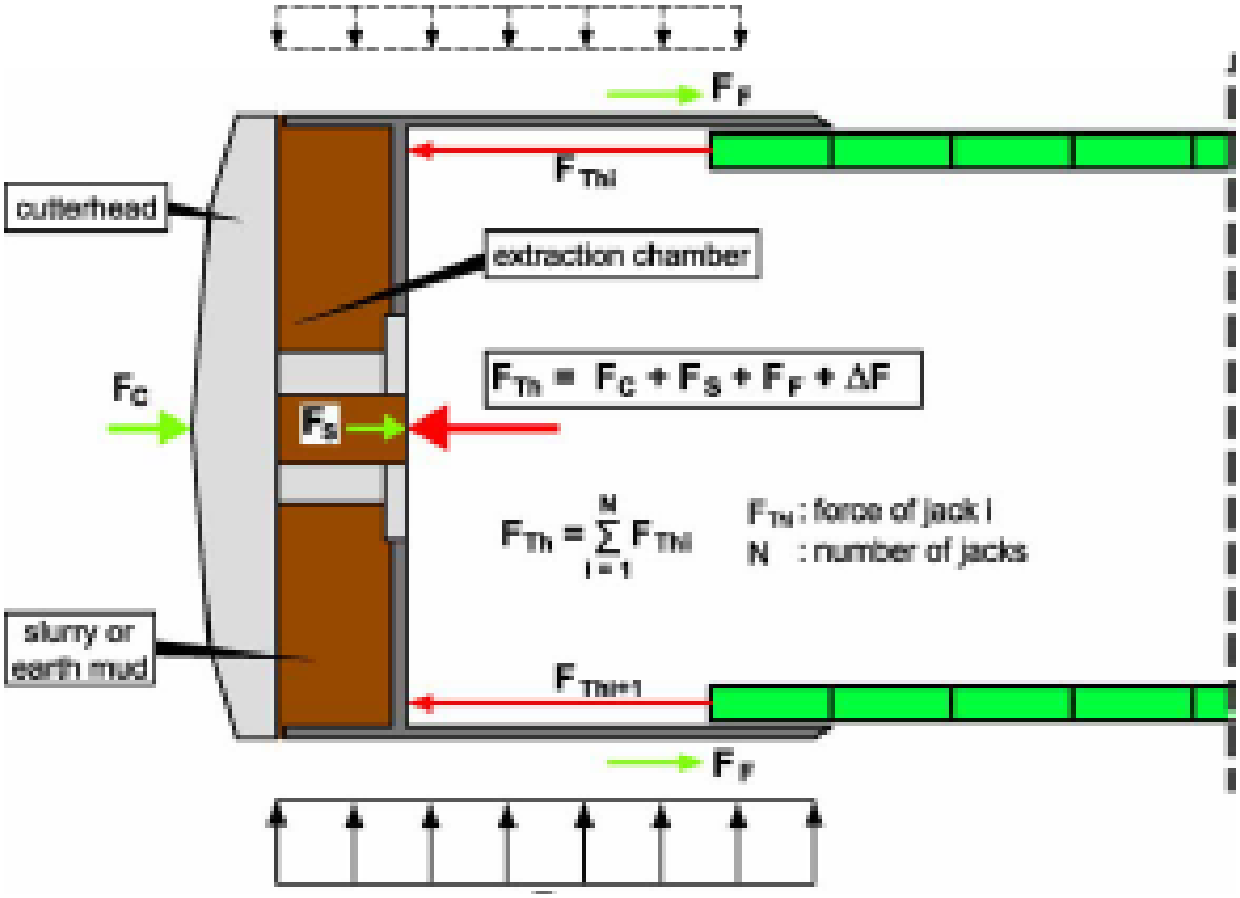
8.6.1.4 Έλξη συρμού εξυπηρέτησης

Η αντίσταση έλξης F_G του συρμού εξυπηρέτησης δύναται να υπολογιστεί ως το άθροισμα αντιστάσεων λόγω τριβής F_{Gfr}, επιτάχυνσης F_{Gac}, εκκίνησης F_{Grs} και κλίσης της χάραξης F_{Gin}:

$$F_G = F_{Gfr} + F_{Gac} + F_{Grs} + F_{Gin};\; F_{Gfr} = k_{Gfr} \cdot M_G, F_{Gac} = k_{Gac} \cdot M_G, F_{Grs} = k_{Grs} \cdot\; M_G, F_{Gin} = k_{Gin} \cdot M_G$$

(8-5)

όπου οι συντελεστές k_{Gfr} , k_{Gac} , k_{Grs} , είναι χαρακτηριστικοί για τον κάθε συρμό εξυπηρέτησης, και ο k_{Gin} είναι η κλίση της χάραξης.



Σχήμα 8-29. Απαιτούμενη ώση μηχανής κλειστού μετώπου

8.6.2 Ροπή στρέψης

Η απαιτούμενη ροπή M_T για τις μηχανές κλειστού μετώπου είναι μεγάλη. Για τις EPB, απαιτείται η μεγαλύτερη ροπή, και μια πρώτη εκτίμησή της δίνεται, συναρτήσει της διαμέτρου D_h (Bickel et al., 1996) της σήραγγας, από τη σχέση:

$$M_T[MNm] = (0.020 \div 0.025) \times D_h^3[m] \tag{8-6}$$

Η ροπή στρέψης M_T της μηχανής πρέπει να είναι ικανή να υπερνικήσει τη ροπή M_C λόγω της αντίστασης των εργαλείων κοπής του πετρώματος, της ροπής M_S λόγω της διατμητικής αντίστασης του υπό πίεση αναδευόμενου πολφού ή λάσπης εμπρός από την κοπτική κεφαλή και εντός του θαλάμου εξαγωγής, καθώς και κάποιες ροπές ΔΜ που οφείλονται σε μη μόνιμες καταστάσεις όπως η απαιτούμενη πρόσθετη ροπή κατά την εκκίνηση.

$$M_T = M_C + M_S + \Delta M \tag{8-7}$$

8.6.2.1 Αντίσταση κύλισης των δίσκων

Η ροπή M_C προσφέρεται από τις αντιστάσεις κύλισης, F_{ri} σε κάθε δίσκο i σε απόσταση r_i από τον άξονα περιστροφής, των κοπτικών δίσκων στο μέτωπο εκσκαφής (βλ. ενότητα 7.3.2.1), οπότε:

$$M_C = \sum_{i=1}^{n_d} F_{ri} \cdot r_i = \left(\sum_{i=1}^{n_d} F_{ci} \cdot r_i \right) \cdot \sqrt{\frac{\delta_p[mm/rev]}{d_d[mm] - \delta_p[mm/rev]}};\ \forall F_{ci} = F_c \Rightarrow M_C = F_c \cdot \sqrt{\frac{\delta_p}{d_d - \delta_p}} \cdot \sum_{i=1}^{n_d} r_i$$

(8-8)

Ο αριστερά τύπος είναι γενικός. Ο δεξιά τύπος προκύπτει από τον γενικό, στην περίπτωση που οι ώσεις των κοπτικών είναι όλες ίσες με F_c.

8.6.2.2 Ανάδευση υλικού μετώπου

Η αντίσταση M_S λόγω περιστροφής του πολφού ή της λάσπης διακρίνεται στην αντίσταση M_H του υλικού εμπρός από την κοπτική κεφαλή και στην αντίσταση M_E του υλικού εντός του θαλάμου απαγωγής. Το υλικό κοπής που περιστρέφεται με την κεφαλή της μηχανής εμπρός από την κοπτική κεφαλή δύναται να θεωρηθεί ότι συμπεριφέρεται ως ελαστοϊξωδοπλαστικό υγρό Bingham ή υλικό Mohr–Coulomb. Το υλικό Bingham χαρακτηρίζεται από τις παραμέτρους τ_o έναρξης της ροής και του δυναμικού ιξώδους η. Η διατμητική τάση αντίστασης του υγρού αυτού στην περιστροφή με γωνιακή ταχύτητα ω, δίνεται από την:

$$\tau = \tau_o + \eta \cdot \left|\frac{\partial v}{\partial y}\right|;\ v(r,y) = -\omega \cdot r \cdot \frac{y}{d_H} \Rightarrow \left|\frac{\partial v}{\partial y}\right| = \frac{\omega}{d_H} \cdot r;\ \ dA = r \cdot dr \cdot d\theta;\ A_H = \pi \cdot R_H^2$$

(8-9)

Επομένως, η ροπή M_H που απαιτείται για να υπερκερασθεί η αντίσταση στην περιστροφή του υλικού εκσκαφής Bingham εμπρός από την κοπτική κεφαλή είναι:

$$M_H = \int_{A_H} r \cdot \tau \cdot dA = \iint_{\theta=0,r=0}^{2\pi,R_H} r \cdot \left(\tau_O + \eta \cdot \frac{\omega}{d_H} \cdot r\right) \cdot r \cdot dr \cdot d\theta =$$
$$= \frac{2}{3} \cdot A_H \cdot R_H \cdot \left(\tau_O + \frac{3}{4} \cdot \eta \cdot \frac{\omega}{d_H} \cdot R_H\right) = \frac{\pi}{12} \cdot D_H^3 \cdot \left(\tau_O + \frac{3}{8} \cdot \eta \cdot \frac{\omega}{d_H} \cdot D_H\right)$$

(8-10)

Όπου A_H είναι το εμβαδόν του εκσκαπτόμενου μετώπου, D_H η διάμετρος του τροχού κοπής και R_H η ακτίνα του, και d_H το πάχος της περιοχής μπροστά από την κοπτική κεφαλή στην οποία η βραχομάζα έχει μετατραπεί σε λάσπη. Παρατηρούμε ότι η ροπή αντίστασης είναι ανεξάρτητη της πίεσης στο μέτωπο.

Αν η διατμητική αντίσταση της λάσπης που περιστρέφεται χαρακτηρίζεται από το κριτήριο Mohr-Coulomb με παραμέτρους τη συνοχή και τη γωνία εσωτερικής τριβής, τότε:

$$\tau = p_s(z') \cdot \tan\varphi + c;\ p_s(z') = p_{so} + \gamma_H \cdot z';\ z' = R_H - z = R_H - r \cdot \sin\theta$$

(8-11)

$$M_H = \int_{A_H} r \cdot \tau \cdot dA = \iint_{\theta=0,r=0}^{2\pi,R_H} r^2 \cdot \{c + [p_{so} + \gamma_H \cdot (R_H - r \cdot sin\,\theta)] \cdot \tan\varphi\} \cdot dr \cdot d\theta =$$
$$= \frac{2}{3} \cdot A_H \cdot R_H \cdot [(p_{so} + \gamma_H \cdot R_H) \cdot \tan\varphi + c] = \frac{\pi}{12} \cdot D_H^3 \cdot \left(p_{s,mean} \cdot tan\,\varphi + c\right)$$
$$M_{Hu} = \frac{\pi}{12} \cdot D_H^3 \cdot c_u;\ \varphi_u = 0$$

(8-12)

Όπου M_{Hu} η ροπή αντίστασης της λάσπης εμπρός από την κοπτική κεφαλή υπό αστράγγιστες συνθήκες, όταν η διάνοιξη πραγματοποιείται υπό τον υδροφόρο ορίζοντα και δημιουργείται υπερπίεση πόρων. Παρατηρούμε ότι για αμελητέα συνοχή (c≈0) η ροπή αντίστασης αυξάνει γραμμικά με τη μέση πίεση, ενώ για αστράγγιστες συνθήκες είναι ανεξάρτητη της πίεσης στο μέτωπο.

Η αντίσταση M_E λόγω της περιστροφής της λάσπης πίσω από την κοπτική κεφαλή στο θάλαμο απαγωγής δύναται να υπολογιστεί ως ποσοστό (ξ-1) της M_H, όπου ξ συντελεστής επαύξησης, οπότε:

$$M_S = M_H + M_E = \xi \cdot M_H;\ \xi > 1$$

(8-13)

Παράδειγμα

Σήραγγα διαμέτρου εκσκαφής D_H=5 m, διανοίγεται από μηχανή EPB. Η κοπτική κεφαλή περιστρέφεται με ω=0.5 rad/s (≈4.8 περιστροφές ανά λεπτό) και η λάσπη στο μέτωπο βρίσκεται υπό μέση πίεση $p_{s,mean}$=150 kPa. Ο χώρος μεταξύ κεφαλής και μετώπου έχει πάχος d_H=0.2 m. Υπολογίστε τη ροπή M_H αντίστασης της λάσπης στο μέτωπο, αν η λάσπη χαρακτηρίζεται ως:

(α) υγρό Bingham με τ_o=30kPa, η=0.2 kPa·s Απάντηση: M_H=8.3 MN·m
(β) πλάσιμο υλικό Mohr Coulomb, με c=0, φ=12^o Απάντηση: M_H=8.3 MN·m
(γ) πλάσιμο υλικό Mohr Coulomb, με c_u=30kPa Απάντηση: M_H=7.9 MN·m

(8-14)

Βιβλιογραφία

Ανδρέου Π (2003). «Μηχανές ολομέτωπης κοπής», Διπλωματική εργασία, Σχολή ΜΜΜ, ΕΜΠ

Bickel JO, Kuesel TR, King EH (1996). "Tunnel Engineering Handbook", ch. 11, ITP.

DAUB (1997). "Empfehlungen zur Auswahl und Bewertung von Tunnelvortriebsmaschinen Recommendations for selecting and evaluating tunnel boring machines", (DAUB), (ÖGG) und Schweiz. Ing. Verein, Tunnel 5, 20-35.

ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-12-02-01-02: (2009) «Tunnel excavation with full-facers or roadheaders – Υπόγεια εκσκαφή σηράγγων με μηχανικά μέσα ολομέτωπης ή σημειακής κοπής», ΕΛΟΤ

Guglielmetti V, Grasso PG, Mahtab A, Xu S eds. (2008). Mechanized tunnelling in urban areas", Taylor & Francis, London.

Maidl B (2004). "Handbuch des Tunnel- und Stollenbaus", Band I, 3. Auflage, Verlag Gluckauf.

Maidl B, Herrenknecht M, Maidl U, Wehrmeyer G (2012). "Mechanised Shield Tunnelling", 2nd ed. Ernst & Sohn – Wiley Blackwell.

Roxborough FF and Phillips HR (1975). "Rock excavation by disc cutter", Int. J. Rock Mech. & Geomech. Abstr., 12, 361-366.

Wittke W, ed. (2007). "Stability analysis and design for Mechanised Tunnelling", WBI-Print 6, VGE-Verlag Gluckauf GmbH, Essen.

Κριτήρια αξιολόγησης

Κριτήριο αξιολόγησης 1

Σήραγγα διαμέτρου εκσκαφής D_H=5 m, διανοίγεται από μηχανή EPB. Η κοπτική κεφαλή περιστρέφεται με ω=0.5 rad/s (≈4.8 περιστροφές ανά λεπτό) και η λάσπη στο μέτωπο βρίσκεται υπό μέση πίεση $p_{s,mean}$=150 kPa. Ο χώρος μεταξύ κεφαλής και μετώπου έχει πάχος d_H=0.2 m. Υπολογίστε τη ροπή M_H αντίστασης της λάσπης στο μέτωπο, αν η λάσπη χαρακτηρίζεται ως ιξώδες υγρό:

Απάντηση/Λύση

(α) υγρό Bingham με τ_o=30kPa, η=0.2 kPa·s Απάντηση: M_H=8.3 MN·m
(β) πλάσιμο υλικό Mohr Coulomb, με c=0, φ=12^o Απάντηση: M_H=8.3 MN·m
(γ) πλάσιμο υλικό Mohr Coulomb, με c_u=30kPa Απάντηση: M_H=7.9 MN·m

Θέματα

Θέμα 1. Καταλληλότητα ασπίδας μεγάλης διατομής

Επιβεβαιώστε την καταλληλότητα του τύπου της ασπίδας που επιλέχθηκε για τη διάνοιξη της γραμμής 3 του μετρό της Αθήνας στο τμήμα: Αγία Μαρίνα-Αγία Βαρβάρα-Κορυδαλλός-Νίκαια.

Θέμα 2. Καταλληλότητα ασπίδας μεσαίας διατομής

Επιβεβαιώστε την καταλληλότητα του τύπου της ασπίδας που επιλέχθηκε για το μετρό της Θεσσαλονίκης.

Θέμα 3. Απαιτούμενες δυνάμεις ώσης και ροπής

Ποιες οι απαιτούμενες και οι προσφερόμενες δυνάμεις ώσης της ασπίδας που επιλέχθηκε για τη διάνοιξη της γραμμής 3 του μετρό της Αθήνας στο τμήμα: Αγία Μαρίνα-Αγία Βαρβάρα-Κορυδαλλός-Νίκαια

Θέμα 4. Απαιτούμενες δυνάμεις ώσης και ροπής

Ποιες οι απαιτούμενες και οι προσφερόμενες δυνάμεις ώσης της ασπίδας που επιλέχθηκε για τη διάνοιξη της γραμμής 3 του μετρό της Θεσσαλονίκης.

Θέμα 5. Χρήση ασπίδας

Στην επέκταση του μετρό της Αθήνας στα τμήματα Αγία Μαρίνα-Αγία Βαρβάρα-Κορυδαλλός-Νίκαια, αφού συλλέξετε τα σχετικά στοιχεία προχώρησης της διάνοιξης μεταξύ δύο σταθμών, υπολογίστε το ρυθμό διάτρησης PR Error! Reference source not found.**, το μηνιαίο ρυθμό προχώρησης MAR, και το ρυθμό προχώρησης του έργου AR=L[m]/T[h].**



Κεφάλαιο 9

Σύνοψη
Τα δίκτυα κοινής ωφελείας απαιτούν τη διάνοιξη σηράγγων μικρής διαμέτρου, στις οποίες συχνά δεν δύναται να εισέλθει άνθρωπος. Οι πολύ μικρού και μικρού μεγέθους διανοίξεις πραγματοποιούνται με μεθόδους οριζόντιας γεώτρησης και εν συνεχεία διεύρυνσης. Μικρού μεγέθους σήραγγες κατασκευάζονται επίσης με μεθόδους της μικροσηραγγοποιίας, με συνεχή έλεγχο και προώθηση των σωλήνων τους από θέσεις έναρξης προς θέσεις στόχους. Η μέθοδος της από μακριά προώθησης των σωλήνων εφαρμόζεται και για τη διάνοιξη μέσης διαμέτρου σηράγγων. Μεγάλης διαμέτρου αλλά μικρού μήκους ανοίγματα πραγματοποιούνται με προώθηση έτοιμων κιβωτίων με εκσκαφή κάτω από την προστασία ασπίδας. Οι παραπάνω μέθοδοι αποτελούν την τρίτη μέθοδο διάνοιξης σηράγγων, μετά τις του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και των TBM με στάσιμες επενδύσεις πίσω από αυτά. Εμπέδωση επιτυγχάνεται με λυμένα παραδείγματα και ασκήσεις.

Προαπαιτούμενη γνώση
Μαθήματα: Εξόρυξη πετρωμάτων, Υποστήριξη υπογείων έργων, Μηχανική πετρωμάτων, Εδαφομηχανική. Χρήσιμη βιβλιογραφία: Stein et al. (1989).

9. Ώθηση σηράγγων

Στην κλασσική σηραγγοποιία η αντιστήριξη της σήραγγας κατασκευάζεται στην περιοχή του μετώπου ή μετά την απομάκρυνσή του. Σε αντιδιαστολή με αυτήν, η σηραγγοποιία με προώθηση της επένδυσης χρησιμοποιεί προκατασκευασμένα τμήματα επένδυσης τα οποία ωθεί συνεχώς από το στόμιο έναρξης της διάνοιξης προς το μέτωπο, συγχρόνως με την εκσκαφή του. Κατ' αυτόν τον τρόπο η σήραγγα είναι εξαρχής υποστηριγμένη σε όλο της το μήκος, χωρίς να κατασκευάζεται η υποστήριξη εντός του υπογείου χώρου.

Με τη μέθοδο αυτή δύνανται να διανοιγούν σήραγγες διαφόρων μεγεθών και σχημάτων. Διακρίνουμε τρεις κατηγορίες διανοίξεων με τη μέθοδο αυτή, τις οριζόντιες κατευθυνόμενες γεωτρήσεις, την προώθηση σωλήνων και την ώθηση κιβωτίων.

9.1 Οριζόντιες κατευθυνόμενες γεωτρήσεις

Η οριζόντια κατευθυνόμενη γεώτρηση (HDD) αναπτύχθηκε αρχικά για τη βιομηχανία πετρελαίου και στη συνέχεια εξελίχθηκε τα τελευταία 30 χρόνια ως μια από τις πολλές τεχνικές που έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για την εγκατάσταση αγωγών, με ελάχιστη διατάραξη στην επίγεια επιφάνεια. Χρησιμοποιείται για την εγκατάσταση αγωγών και καλωδίων, κάτω από δυσπρόσιτα μέρη, όπως ποτάμια ή αεροδρόμια, με μήκος διάτρησης έως 3000 m.

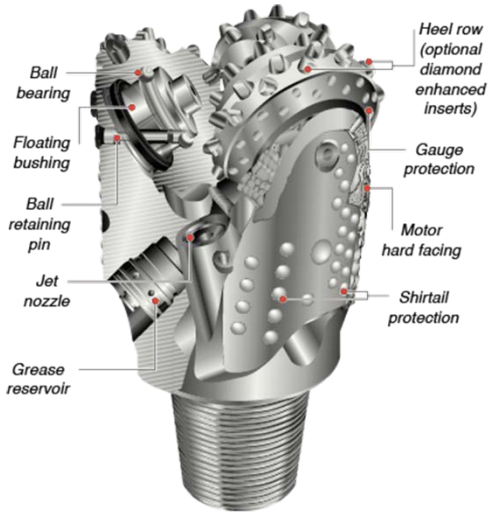
Η HDD χρησιμοποιεί γεωτρητικό εξοπλισμό επιφανείας για την κοπή μιας πιλοτικής γεώτρησης μεταξύ δύο σημείων, σε διάμετρο περίπου 100 έως 200 mm, ανάλογα με το μέγεθος και το μήκος του τελικού ανοίγματος. Η διάτρηση πραγματοποιείται με ενδοδιατρηματική σφύρα (Down the Hole) και εξωτερική χρήση μπεντονίτη για λιπαντικό. Πίσω από την εκσκαφή ακολουθεί η σωλήνωση που αποτελείται από χαλυβοσωλήνες 9 m (μπορεί να είναι και υψηλής πυκνότητας PVC). Ο έλεγχος της πορείας γίνεται από τις πληροφορίες που λαμβάνονται από ενδοσκοπικές διατάξεις που βρίσκονται στο διαμέρισμα της κεφαλής.

Η γεώτρηση στη συνέχεια μεγεθύνεται με διευρυντές (275-300mm) που σύρονται πίσω μέσα από την αρχική πιλοτική γεώτρηση, μέχρι να επιτευχθεί η απαιτούμενη διάμετρος. Τέλος, ο μόνιμος αγωγός έλκεται στη θέση του από το συγκρότημα της γεώτρησης. Κανονικά η γεώτρηση διευρύνεται 1.2 έως 1.5 φορά τη διάμετρο του τελικού εγκατεστημένου σωλήνα, για τη μείωση της τριβής σε αυτόν κατά τη διάρκεια της έλξης του. Σε όλη τη διάρκεια της διαδικασίας, η γεώτρηση σταθεροποιείται και το υλικό εκσκαφής ξεπλένεται, χρησιμοποιώντας πολφό που αντλείται στη γεώτρηση, από την επιφάνεια, μέσω του διευρυντή.

Η HDD απαιτεί, ανάλογα με τις συνθήκες του εδάφους, όγκο πολφού δύο έως τέσσερις φορές μεγαλύτερο από τον όγκο της γεώτρησης. Ο πολφός που εξέρχεται από την γεώτρηση μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί, αφού πρώτα διαχωριστεί από τα υλικά εκσκαφής. Για τη διασφάλιση της συνεχούς παροχής του υγρού διάτρησης, απαιτείται επί τόπου εξοπλισμός ανάμειξης και άντλησης του πολφού. Αυτός ο εξοπλισμός, σε μικρά έργα μπορεί να αποτελεί μέρος του εξοπλισμού διάτρησης, όμως για μεγαλύτερα έργα απαιτεί ανεξάρτητη εγκατάσταση παράλληλα με τον εξοπλισμό της διάτρησης. Ο πολφός βασίζεται συνήθως σε αιώρημα μπεντονίτη. Ωστόσο, πρόσμικτα και πολυμερή μπορούν να αναμιγνύονται για τη βελτίωση της απόδοσης. Στα κοκκώδη εδάφη, τα πολυμερή είναι απαραίτητα για την αποτροπή της απώλειας υγρού διάτρησης στο περιβάλλον έδαφος, λόγω της υψηλής διαπερατότητας και επίσης για την πρόληψη της κατάρρευσης του περιβάλλοντος γεωυλικού μέσα στη γεώτρηση.



(α) Συγκρότημα HDD με κεφαλή κοπής τύπου σμίλης



(β) Κεφαλή κοπής σκληρών σχηματισμών

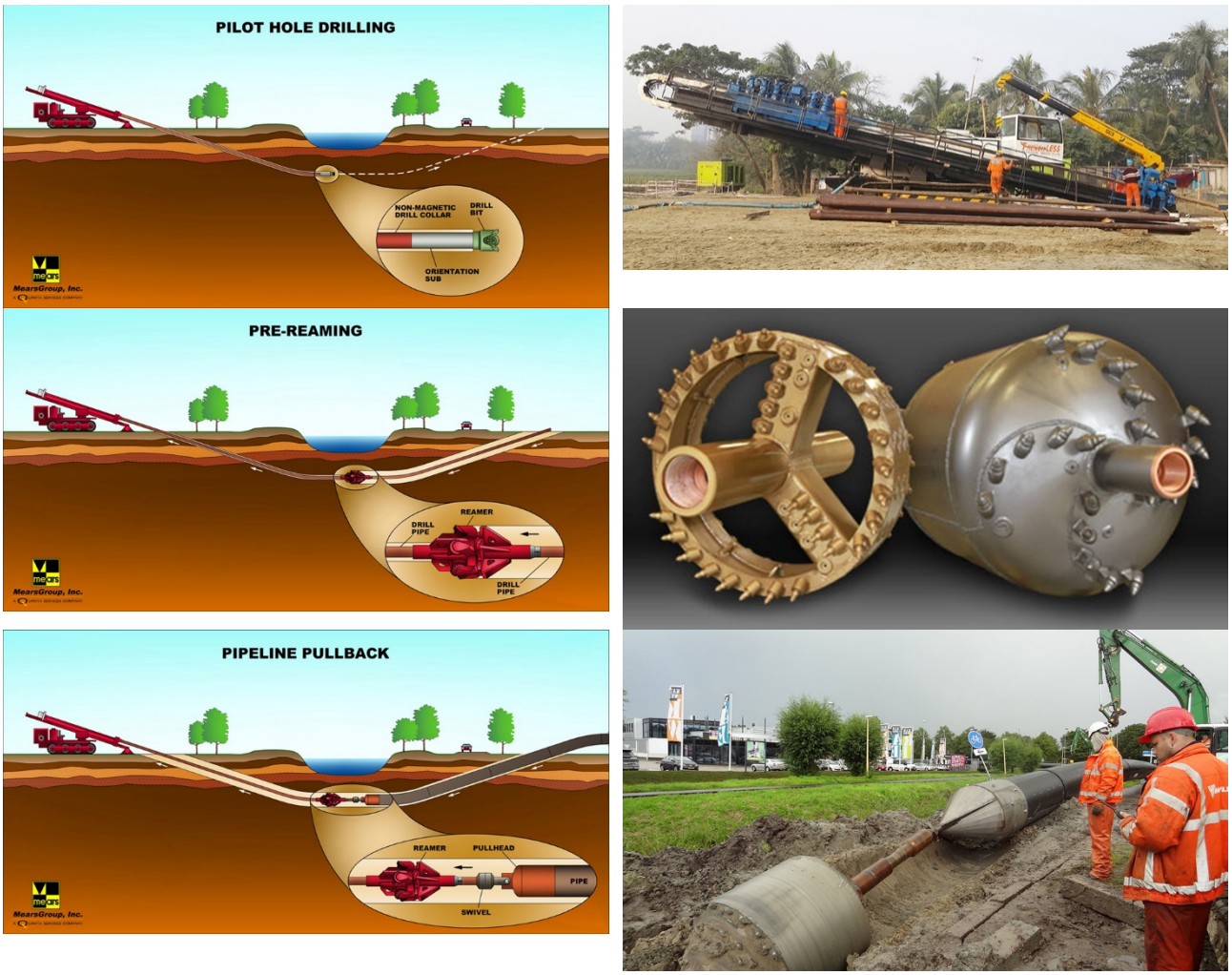
Σχήμα 9-1. Συγκρότημα HDD και κοπτικές κεφαλές για μαλακούς και για σκληρούς σχηματισμούς

Το Σχήμα 9-1α απεικονίζει έναν μεσαίου μεγέθους εξοπλισμού HDD, που περιλαμβάνει την κεφαλή διάτρησης της πιλοτικής γεώτρησης. Βασικό ζητούμενο κατά την καθοδήγηση της πιλοτικής γεώτρησης είναι η γνώση της θέσης της κεφαλής διάτρησης. Αυτή μπορεί να παρακολουθείται χρησιμοποιώντας έναν πομπό, που τοποθετείται ακριβώς πίσω από την κεφαλή διάτρησης και μεταδίδει τη θέση της ασύρματα. Το σήμα μπορεί να λαμβάνεται στην επιφάνεια του εδάφους από ένα άτομο που περπατά τη διαδρομή της διάτρησης με έναν ανιχνευτή σήματος. Η ανίχνευση της πορείας γίνεται με ηλεκτρομαγνητικά κύματα χαμηλής συχνότητας που εκπέμπονται από τον πομπό που βρίσκεται στο κοπτικό άκρο και λαμβάνονται από τον δέκτη στην επιφάνεια. Εναλλακτικά, όταν η πρόσβαση στην επιφάνεια του εδάφους είναι δύσκολη ή για διανοίξεις πολύ μεγάλου μήκους, το σήμα μπορεί να αποστέλλεται κατευθείαν από τον αισθητήρα στον εξοπλισμό διάτρησης, μέσα από τη γεώτρηση μέσω ενός καλωδίου.

Η HDD μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εγκατάσταση αγωγών σε μαλακές ή βραχώδεις γεωμάζες, τόσο πάνω όσο και κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα, με κατάλληλη επιλογή των εργαλείων κοπής και ρύθμιση του ρυθμού διάτρησης και της πίεσης και του ρυθμού ροής του πολφού. Μία από τις κύριες διαφορές μεταξύ της διάτρησης μέσω του μαλακού εδάφους και του σκληρού βράχου είναι η διαμόρφωση της κεφαλής διάτρησης και του διευρυντή. Κατά τη διάτρηση σε μαλακά εδάφη χρησιμοποιούνται κεφαλές διάτρησης τύπου «σμίλης» (Σχήμα 9-1α) και ο εξοπλισμός διάτρησης παρέχει ώση και περιστροφή στην κεφαλή. Προκειμένου να καθοδηγείται η γεώτρηση ευθύγραμμα, οι ράβδοι, καθώς ωθούνται προς τα εμπρός, περιστρέφονται συνεχώς. Για να δοθεί καμπυλότητα στην κατεύθυνση, σταματά η περιστροφή και οι ράβδοι διάτρησης απλώς ωθούνται προς τα εμπρός. Στην περίπτωση αυτή, οι δυνάμεις στη γωνιακή κεφαλή διάτρησης εξαναγκάζουν την κεφαλή να αποκλίνει από την τρέχουσα κατεύθυνσή της. Όταν η διάτρηση πραγματοποιείται σε βράχο, χρησιμοποιούνται κοπτικά διάτρησης πετρώματος (Σχήμα 9-1β). Ο εξοπλισμός διάτρησης παρέχει επίσης ώση και περιστροφή στην κεφαλή, αλλά επιπλέον ένας κινητήρας πίσω από το κοπτικό διάτρησης παρέχει ισχύ στο εργαλείο κοπής. Ένας κινητήρας πολφού, χρησιμοποιεί τη δύναμη του αντλούμενου πολφού στην κεφαλή της γεώτρησης για να περιστρέφει το εργαλείο κοπής. Για να κατευθυνθεί σε καμπύλη η γεώτρηση, η περιστροφή

σταματά και πάλι και οι σωλήνες διάτρησης ωθούνται προς τα εμπρός. Στην περίπτωση αυτή, μια λυγισμένη υποδιάταξη, που βρίσκεται πίσω από το εργαλείο κοπής προκαλεί την απόκλιση της κεφαλής διάτρησης.

Γενικά, το εφικτό μήκος διάτρησης με την HDD σχετίζεται με τη διάμετρο του εγκατεστημένου αγωγού· όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος του σωλήνα, τόσο μικρότερο είναι το επιτεύξιμο μήκος διάνοιξης. Μεγαλύτερα μήκη διάνοιξης μπορούν να επιτευχθούν για σωλήνες διαμέτρου μικρότερης του 1 m. Σωλήνες διαμέτρου 1 m, μπορούν να τοποθετηθούν για μήκη μέχρι 1200 m. Σωλήνες διαμέτρου 2 m, μπορούν να τοποθετηθούν για μήκη μέχρι 500 m. Η HDD χρησιμοποιείται επίσης για την εγκατάσταση αγωγών καλωδίων μικρότερης διαμέτρου, για μικρότερες αποστάσεις, πχ. για διάμετρο 0.5 m επιτυγχάνονται μήκη πάνω από 200 m. Όσον αφορά τις μεγαλύτερες HDD διανοίξεις, στα τυπικά παραδείγματα συμπεριλαμβάνονται (Ma & Najafi, 2008): η υπόγεια ζεύξη του ποταμού Wei στην Κίνα με μήκος διάτρησης 2873 m για την εγκατάσταση χαλύβδινων σωλήνων διαμέτρου 660 mm και 114 mm· η ζεύξη της πύλης Modao στην Κίνα με μήκος διάτρησης 2630 m για την εγκατάσταση χαλύβδινων αγωγών αποστράγγισης διαμέτρου 660 mm· και η ζεύξη του ποταμού Elbe (Έλβα) στη Γερμανία, μήκους 2626 m για την εγκατάσταση σωλήνα από HDPE (Υψηλής Πυκνότητας Πολυαιθυλενίου) διαμέτρου 350 mm. Το Σχήμα 9-2 δείχνει τη διαδικασία γεώτρησης-διεύρυνσης-τοποθέτησης αγωγού, καθώς και τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται.

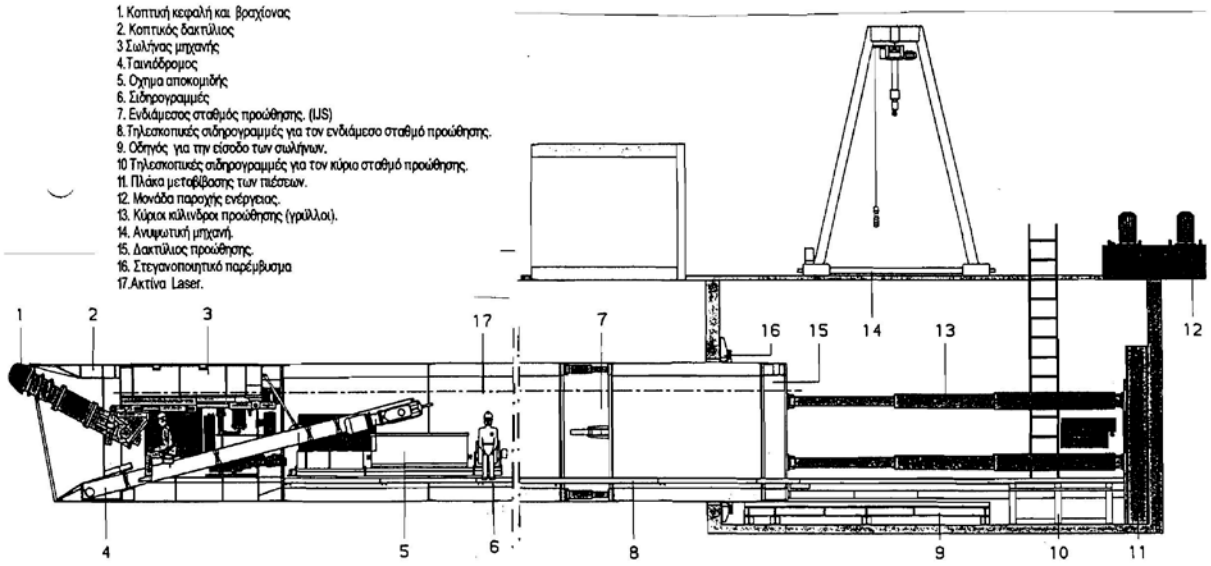


Σχήμα 9-2. Φάσεις τοποθέτησης αγωγού με την HDD

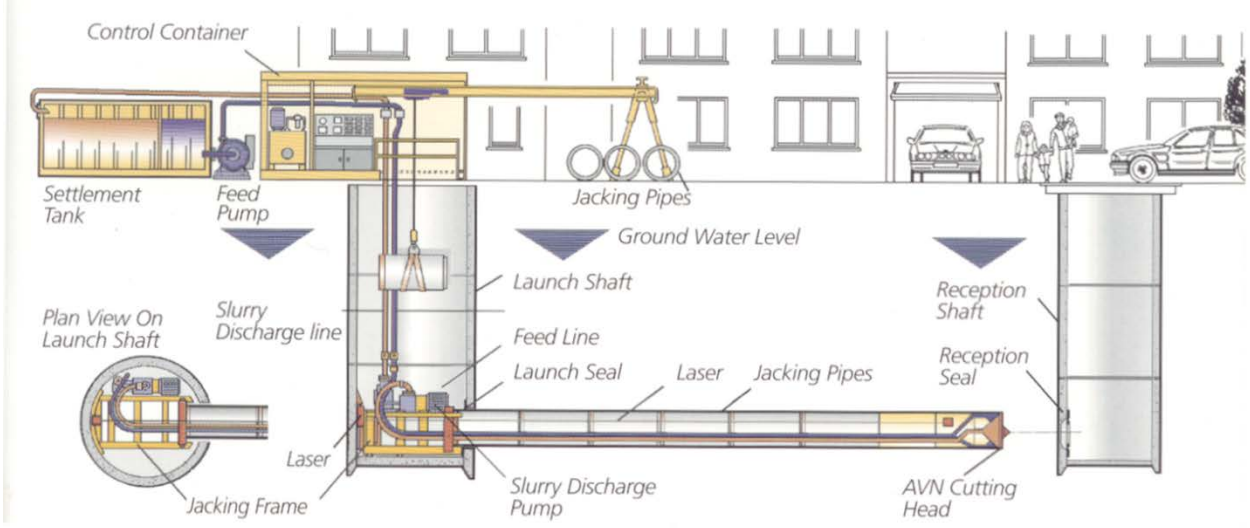
Γεωτρήσεις μικρότερης διαμέτρου επιτυγχάνονται με μεθόδους μετατόπισης (displacement / compaction) του εδάφους και ανοικτού σωλήνα. Οι μέθοδοι μετατόπισης του εδάφους βασίζονται στη διείσδυση μίας σφηνοειδούς κεφαλής μέσα στο έδαφος με στατικό ή δυναμικό τρόπο. Πίσω από την κοπτική κεφαλή ακολουθεί η προστατευτική ή η παραγωγική σωλήνωση, η οποία προωθείται με διάφορες διατάξεις.

9.2 Προώθηση σωλήνων

Η προώθηση σωλήνων είναι μία από τις πολλές τεχνικές της σηραγγοποιίας για τη διάνοιξη σηράγγων με διάμετρο έως ~3 m. Ισχυροί υδραυλικοί ωστήρες χρησιμοποιούνται για την ώση ειδικά σχεδιασμένων σωλήνων στο έδαφος πίσω από μια ασπίδα, ταυτόχρονα με την εκσκαφή που λαμβάνει χώρα μέσα στην ασπίδα. Καθώς εκσκάπτεται η σήραγγα, η μέθοδος παρέχει μια εύκαμπτη, ισχυρή, υδατοστεγή, τελειωμένη σωλήνωση. Η εφαρμογή της έχει ιδιαίτερη αξία για τη διάνοιξη αβαθών υπογείων ανοιγμάτων εντός του αστικού ιστού, αντί της ανοικτής εκσκαφής και στη συνέχεια επικάλυψης. Στην περίπτωση αυτή η μέθοδος ονομάζεται trenchless technology (χωρίς την εκσκαφή τάφρων-υπόγεια τεχνική), όρος που εισήχθη τη δεκαετία του 1980. Ο όρος εμπεριέχει μια ποικιλία μεθόδων διάνοιξης σηράγγων για την κατασκευή υπογείων δικτύων εξυπηρέτησης. Τα δίκτυα αυτά μπορεί να είναι αγωγοί αποχέτευσης όμβριων ή ακαθάρτων, ύδρευσης, μεταφοράς ρευστών ή φυσικού αερίου, και ηλεκτρικών ή τηλεπικοινωνιακών καλωδίων.



(α) Σύστημα προώθησης σωλήνων, (Alpine - Westfalia)



(β) Σύστημα διάνοιξης μικροσηράγγων, (AVN, Herrenknecht)

Σχήμα 9-3. Προώθηση σωλήνων

Η ώθηση σωλήνων χρησιμοποιείται για τη διάνοιξη σηράγγων κάτω από οδούς, σιδηροδρόμους, και διώρυγες, δηλαδή εκεί όπου η πρόσβαση στην επιφάνεια του εδάφους είναι περιορισμένη, ή όπου η ανοιχτή εκσκαφή θα δημιουργούσε σημαντική διαταραχή. Σε αντίθεση με τις συμβατικές διανοίξεις σηράγγων, στις οποίες η επένδυσή τους κατασκευάζεται αμέσως πίσω από το μέτωπο εκσκαφής, με τη μέθοδο ώθησης

σωλήνων οι πλήρεις διατομές της επένδυσης είναι προκατασκευασμένες και ωθούνται στη θέση τους από έναν φρέαρ. Με αυτόν τον τρόπο σχηματίζεται μια σειρά από τμήματα σωλήνων που όλα μετακινούνται μέσα στο έδαφος μέχρι να επιτευχθεί το επιθυμητό μήκος της σήραγγας.

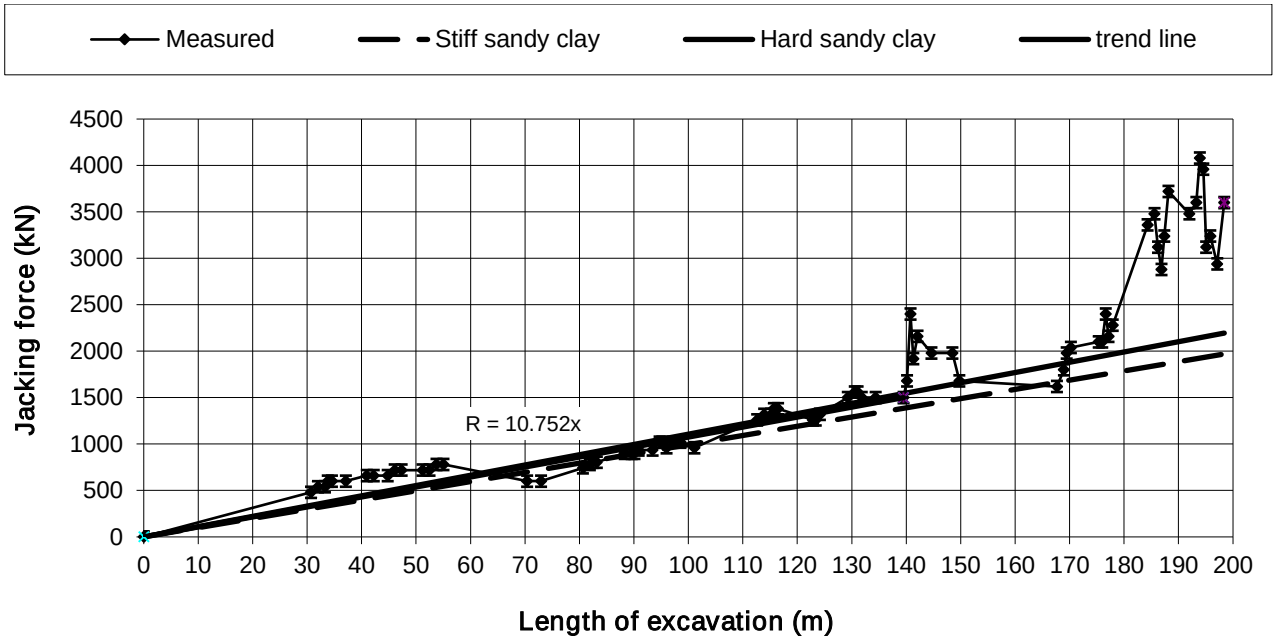
Την προώθηση σωλήνων μεγαλύτερης διαμέτρου (Σχήμα 9-3α), ακολούθησε ως αναγκαιότητα η διάνοιξη σηράγγων διαμέτρου μικρότερης από 0.9 m, όπου δεν μπορεί να εισέλθει άνθρωπος (Σχήμα 9-3β). Είναι πολύ πιθανό, κανονισμοί ασφαλείας εργαζομένων, στο μέλλον, να αυξήσουν αυτό το όριο. Για αυτές τις πολύ μικρής διαμέτρου σήραγγες αναπτύχθηκαν μικρογραφίες TBM. Αυτή η ανάπτυξη μικρών TBM, οδήγησε στον όρο μικροσηραγγοποιία (microtunnelling), που είναι υποκατηγορία της τεχνικής της προώθησης σωλήνων. Στην απλούστερη μορφή της, μικροσηραγγοποιία είναι η κατασκευή σήραγγας με χρήση ενός τηλεχειριζόμενου μικρού TBM (EPBM ή SPBM), που προωθείται με την ώθηση σωλήνων. Γενικότερα, είναι μέθοδοι διάνοιξης μερικώς ή πλήρως εκμηχανισμένες που ελέγχονται από απόσταση και οι οποίες χαρακτηρίζονται από σύγχρονη τεχνολογία (Ψωμάς, 1995). Η τεχνολογία αυτή δύναται να διαχωριστεί σε τρεις κύριες ομάδες, ήτοι νέα κατασκευή για την τοποθέτηση ενός νέου σωλήνα στο δίκτυο, ανακατασκευή (renewal) παλαιού σωλήνα με την τοποθέτηση ενός νέου σε μία παλαιά γραμμή του δικτύου και ανανέωση (renovation) για την επένδυση ενός παλαιού φθαρμένου σωλήνα. Οι νέοι και οι ανακατασκευαζόμενοι σωλήνες τοποθετούνται υπόγεια, εφαρμόζοντας την τεχνική της ώθησης σωλήνων (pipe jacking). Κατά την τεχνική αυτή ωθούνται συνεχώς τμήματα σωλήνα από ένα φρέαρ προς το μέτωπο της διανοιγόμενης σήραγγας. Κατά την ανακατασκευή των αγωγών οι παλαιοί θραύονται ή εξολκούνται και αντικαθίστανται από νέους σωλήνες. Η ανανέωση των παλαιών σωλήνων γίνεται βασικά με την εσωτερική επανεπένδυση του υπάρχοντα παλαιού σωλήνα με κατάλληλο υλικό.

9.2.1 Η μέθοδος

Η διαδικασία τοποθέτησης δικτύων με μεθόδους ώθησης, εμπεριέχει τρεις φάσεις, ήτοι αρχικά κατασκευάζονται τα φρέατα εκκίνησης και άφιξης του εξοπλισμού, κατόπιν πραγματοποιείται η μηχανική όρυξη και η διαδοχική τοποθέτηση της σωλήνωσης ανά τμήματα και, τέλος, γίνονται οι εργασίες παράδοσης του κατασκευασμένου τμήματος σε λειτουργία.

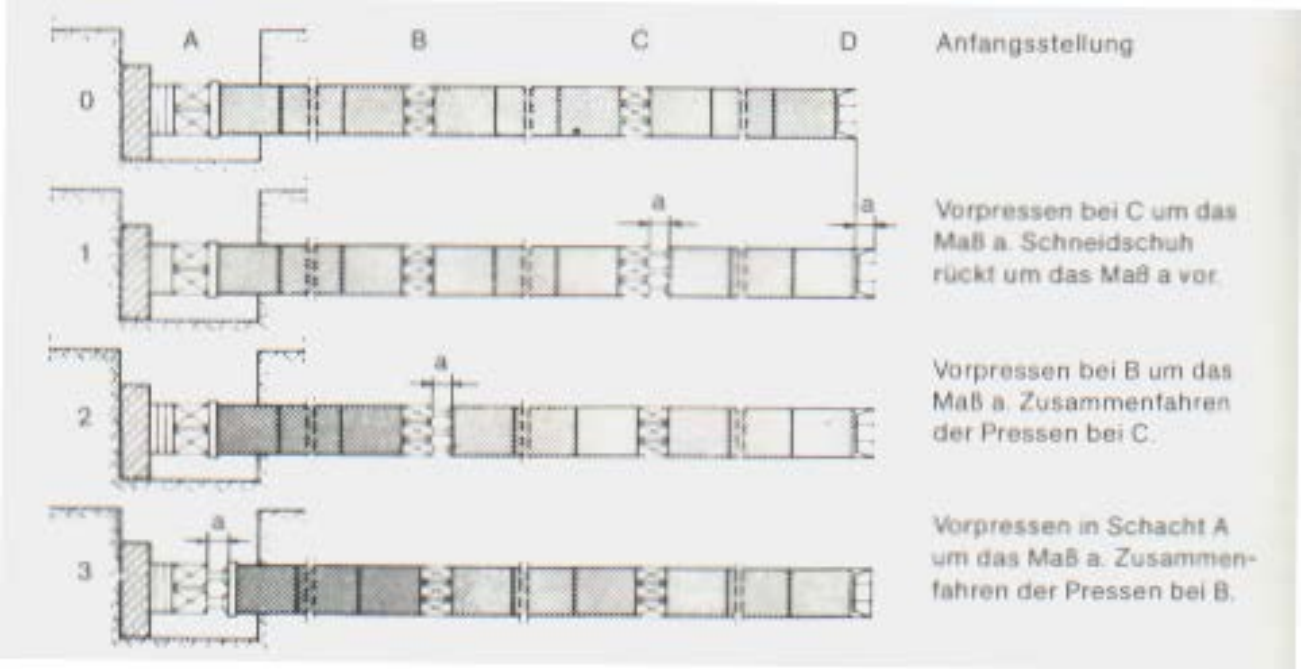
9.2.1.1 Αντιστάσεις στην ώθηση

Το γεγονός ότι όλα τα τμήματα επένδυσης της σήραγγας ωθούνται μέσα από το έδαφος, σημαίνει ότι αυτά πρέπει να αναλαμβάνουν σημαντικές αξονικές θλιπτικές δυνάμεις, οι οποίες κατά συνέπεια επιβάλουν το σχεδιασμό τους. Κατά τη διάρκεια της ώθησης αναπτύσσονται μεγάλες αντιστάσεις τριβής μεταξύ των τμημάτων της επένδυσης και του εδάφους και επομένως η δύναμη που απαιτείται για την ώθηση μέσω του εδάφους αυξάνεται με το μήκος της σήραγγας. Τα φορτία που απαιτούνται για την προώθηση του αγωγού είναι κυρίως συνάρτηση των αντιστάσεων τριβής γύρω από τον αγωγό. Αυτές οι δυνάμεις εξαρτώνται από τον τύπο του εδάφους και, ιδιαίτερα, από τα χαρακτηριστικά αψίδωσής του, το βάθος των υπερκειμένων και κάθε επιφόρτιση, το μήκος και τη διάμετρο του σωλήνα και το χρόνο που απαιτείται για την ώθηση. Μολονότι είναι δύσκολο να εκτιμηθούν με ακρίβεια αυτές οι δυνάμεις χρησιμοποιώντας τη θεωρία της εδαφομηχανικής, οι κατασκευαστές, μετά από χρόνια εμπειρίας παρήγαγαν εμπειρικές τιμές για τις δυνάμεις τριβής, που βρίσκονται μεταξύ 5 και 25 kN/m^2 της επιφάνειας της εξωτερικής περιφέρειας. Αυτά τα φορτία ώσης πρέπει να αναλαμβάνονται εντός του φρέατος εκκίνησης από έναν τοίχο ώσης στο πίσω μέρος του φρέατος που να μπορεί να τα μεταφέρει στο περιβάλλον έδαφος. Η αντίσταση τριβής των σωλήνων κατά την προώθησή τους, όπως φαίνεται π.χ. στο Σχήμα 9-4 από μετρήσεις κατά τη διάνοιξη αγωγού κάτω από την ΑΤΤΙΚΗ ΟΔΟ, τείνει να είναι ανάλογη προς το μήκος προώθησης. Ειδικότερα, κατά τις επανεκκινήσεις, μετά από σταματήματα, οι απαιτούμενες δυνάμεις είναι μεγαλύτερες από αυτές κατά τη συνέχιση της προώθησης. Κατά συνέπεια, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στην επιλογή της απόστασης των φρεάτων εισόδου και εξόδου του εξοπλισμού. Μία τεχνική για την αύξηση του μήκους ώσης είναι η προώθηση από δύο φρέατα προς μια ενδιάμεση θέση όπου μπορεί να γίνει υπόγεια σύνδεση. Αυτή η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μεγάλη ποικιλία συνθηκών εδάφους.



Σχήμα 9-4. Δύναμη ώσης ως συνάρτηση του μήκους ώθησης. (Sofianos et al., 2003)

Οι αντιστάσεις τριβής μπορούν να μειωθούν με διάφορους τρόπους, όπως η ασπίδα να κατασκευάζεται μερικά εκατοστά μεγαλύτερη σε διάμετρο από τα εγκαθιστάμενα τμήματα επένδυσης της σήραγγας. Αυτό δημιουργεί ένα κενό εντός του οποίου μπορεί να αντληθεί λιπαντικό. Το δακτυλιοειδές κενό και το λιπαντικό συμβάλλουν στη μείωση των αντιστάσεων τριβής. Ωστόσο, αυτό το διάκενο μπορεί να κλείνει, καθώς το έδαφος μετατοπίζεται προς την επένδυση της σήραγγας, και αυτή η μετατόπιση μπορεί να προκαλέσει καθιζήσεις. Το λιπαντικό εντός του διακένου βοηθά στη σταθεροποίηση του εδάφους και στο τέλος της διαδικασίας ώθησης των σωλήνων το διάκενο συχνά ενεματώνεται. Ένας εναλλακτικός τρόπος για τη μείωση των δυνάμεων ώθησης, είναι να εισαχθούν ενδιάμεσοι σταθμοί ώθησης ανά διαστήματα κατά μήκος της σήραγγας. Αυτό σημαίνει ότι μήκη της σήραγγας μπροστά από τον ενδιάμεσο σταθμό ώθησης μπορούν να προωθούνται, ακολουθούμενα στη συνέχεια από άλλα πιο πίσω (Σχήμα 9-5). Κατ' αυτόν τον τρόπο προωθείται κάθε φορά ένα μειωμένο μήκος σήραγγας, σε μια λειτουργία όπως η κάμπια.



Σχήμα 9-5. Προώθηση με χρήση ενδιάμεσων σταθμών ώθησης

9.2.1.2 Διάνοιξη

Η τεχνική ώθησης σωλήνων απαιτεί την κατασκευή δύο φρεάτων σε βάθος μέχρι λίγο κάτω από το ανάστροφο της προτεινόμενης σήραγγας. Το φρέαρ εκκίνησης είναι εκεί όπου συμβαίνουν οι εργασίες κατασκευής, ενώ το φρέαρ άφιξης απαιτείται μόνο για την αφαίρεση της μηχανής, στο τέλος της διάνοιξης. Οι ισχυρές δυνάμεις που απαιτούνται για την ώση των σωλήνων παρέχονται από ισχυρά υδραυλικά έμβολα που εγκαθίσταται στον πυθμένα του φρέατος εκκίνησης. Ο αριθμός των ωστήρων που χρησιμοποιούνται ποικίλει με το μέγεθος του σωλήνα, την αντοχή των σωλήνων, το μήκος που πρόκειται να εγκατασταθεί και την προβλεπόμενη αντίσταση τριβής, και συνίσταται κανονικά από δύο ή τέσσερα υδραυλικά έμβολα. Στο οπίσθιο τοίχωμα του φρέατος, εκεί όπου μεταφέρονται τα φορτία από τον εξοπλισμό ώθησης, κατασκευάζεται ένας τοίχος ανάληψης των μεγάλων δυνάμεων που απαιτούνται κατά τη διάρκεια της προχώρησης. Σε πτωχά εδάφη, μπορεί να χρειαστούν πάσσαλοι ή άλλες ειδικές διατάξεις που θα αυξήσουν την ικανότητα αντίδρασης του τοίχου ώσης. Όπου δεν υπάρχει επαρκές βάθος για την κατασκευή του τοίχου ώσης, η αντίδραση στην ώση πρέπει να παρέχεται από ισχυρή κατασκευή επί του εδάφους. Η διαδρομή του εμβόλου του ωστήρα μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη τεχνική. Χρησιμοποιούνται είτε ωστήρες μικρής διαδρομής εμβόλου με πολλούς αποστάτες, μεσαίας διαδρομής με σωλήνες μικρότερου μήκους ή μεγάλης διαδρομής που μπορούν να ωθήσουν έναν ολόκληρο σωλήνα. Το φρέαρ εκκίνησης πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο, ώστε να επιτρέπει το χειρισμό με ασφάλεια, της μηχανής της σήραγγας, των τμημάτων σωλήνα, και του εκσκαφθέντος υλικού.

Μόλις κατασκευαστεί το φρέαρ και εγκατασταθεί ο εξοπλισμός ώθησης, καταβιβάζεται στον πυθμένα και τοποθετείται προσεκτικά, η μηχανή διάνοιξης. Η μηχανή προωθείται και εκσκάπτει αρχικά μέσα από τα πλευρά του φρέατος. Συνήθως έχει κατασκευαστεί μια ασθενής περιοχή στον τοίχο, που επιτρέπει τη διέλευση της μηχανής. Μόλις τα έμβολα φθάσουν στην πλήρη επέκτασή τους, υποχωρούν και ο πρώτος σωλήνας της σήραγγας καταβιβάζεται στο συγκρότημα ώθησης και τοποθετείται στο πίσω μέρος της μηχανής διάνοιξης. Αυτός ο σωλήνας και η μηχανή προωθούνται έξω από το φρέαρ. Μόλις τα έμβολα εκταθούν πλήρως, υποχωρούν πάλι, ένας νέος σωλήνας καταβιβάζεται και τοποθετείται στη θέση του, και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Όλοι οι ηλεκτρικοί αγωγοί, οι σωλήνες πίεσης και νερού, οι γραμμές επικοινωνίας και τυχόν άλλοι αγωγοί εξυπηρέτησης της διάνοιξης, κατά την τοποθέτηση κάθε νέου σωλήνα, αποσυνδέονται, επεκτείνονται και επανασυνδέονται.

Καθώς συνεχίζεται η διαδικασία ώθησης, η λίπανση, η οποία μπορεί να βασίζεται σε άργιλο όπως ο μπεντονίτης ή ένα πολυμερές, αντλείται στο διάκενο μεταξύ σωλήνων και εδάφους, για τη μείωση της τριβής. Σε ορισμένες αποστάσεις, κατά τη διάρκεια της διάνοιξης, καταβιβάζονται στον πυθμένα του φρέατος ενδιάμεσοι σταθμοί ώθησης. Αυτοί αποτελούνται από δύο χαλύβδινες σωλήνες που συνδέονται μεταξύ τους με υδραυλικούς ωστήρες. Αυτοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μειώσουν τις δυνάμεις των εμβόλων στο φρέαρ ώθησης, αν οι δυνάμεις γίνουν υπερβολικά υψηλές, και χρησιμοποιούνται επιπλέον της λίπανσης. Είναι χρήσιμο να υπάρχουν κατά μήκος της ωθούμενης σήραγγας, ως πρόνοια, ακόμη και αν δεν χρησιμοποιηθούν. Ο ρυθμός προχώρησης ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με τις συνθήκες εδάφους, και είναι συνήθως μεταξύ 7.5 και 20 m την ημέρα.

Στις μικροσήραγγες, η μηχανή διάνοιξης ελέγχεται από απόσταση με συστήματα να βρίσκονται στο επίπεδο του εδάφους, δίπλα από το φρέαρ ώθησης. Η ασπίδα συνήθως είναι αρθρωτή αποτελούμενη από δύο τμήματα. Η κατεύθυνση της μηχανής πραγματοποιείται με τη χρήση εμβόλων ενσωματωμένων στις αρθρώσεις. Αυτά επιτρέπουν κατακόρυφη και οριζόντια προσαρμογή της κατεύθυνσης κατά τη διάρκεια της διάνοιξης. Ο πίνακας ελέγχου μεταξύ άλλων δίνει πληροφορίες για την επέκταση των εμβόλων διεύθυνσης, και για το σύστημα καθοδήγησης με λέιζερ.

Οι σωλήνες της σήραγγας παρασκευάζονται από διάφορα υλικά, αλλά συνήθως είναι από οπλισμένο σκυρόδεμα, ή πλαστικό ενισχυμένο με ίνες υάλου (GRP), ή χάλυβα ή υαλοποιημένη άργιλο. Για να εξασφαλιστεί ότι οι δυνάμεις ώσης διανέμονται ομοιόμορφα στην περιφέρεια του σωλήνα, παρέχεται ένας δακτύλιος ώσης η μορφή του οποίου εξαρτάται από τον αριθμό των ωστήρων που χρησιμοποιούνται. Οι ωστήρες είναι υδραυλικά διασυνδεμένοι ώστε να εξασφαλίζεται ότι η ώθηση από τον καθένα είναι η ίδια. Αντίστοιχα, πρέπει να αποφεύγεται η υπερβολική τοπική πίεση στους αρμούς μεταξύ των σωλήνων, που θα μπορούσε να προκαλέσει θρυμματισμό-αποφλοίωση και ενδεχομένως αστοχία. Προκειμένου να διαμοιραστεί το φορτίο ομοιόμορφα, ώστε να μειωθούν οι συγκεντρώσεις τάσεων, εισάγονται στους αρμούς λωρίδες ινοσανίδας μέσης πυκνότητας (MDF) ή άλλου υλικού.

Δεν υπάρχει θεωρητικό όριο στο μήκος των μεμονωμένων ωθήσεων, αν και πρακτικά τεχνικά και οικονομικά θέματα επιβάλουν περιορισμούς. Διανοίξεις πάνω από 300 m είτε σε ευθεία γραμμή ή σε καμπύλη, είναι δυνατές. Μικροσήραγγες διανοίγονται σε μήκη πάνω από 80 m με συστήματα τηλεχειρισμού. Οι κατασκευαστικές ανοχές είναι αντίστοιχες με άλλες μεθόδους σηραγγοποιίας και η μέθοδος ώθησης σωλήνων απαιτεί γενικά λιγότερη υπερεκσκαφή σε σχέση με τη μέθοδο των προκατασκευασμένων τόξων, παρέχοντας έτσι καλύτερη υποστήριξη εδάφους. Οι μέθοδοι εκσκαφής είναι παρόμοιες με αυτές που χρησιμοποιούνται από άλλες μεθόδους σηραγγοποιίας που κάνουν χρήση χειρωνακτικής ή μηχανικής εκσκαφής.

Στο τέλος κάθε διάνοιξης, για την απομάκρυνση της ασπίδας, απαιτείται ένα φρέαρ υποδοχής επαρκούς μεγέθους. Η αρχική ευθυγράμμιση των ωστήρων επιτυγχάνεται με την ακριβή τοποθέτηση κατευθυντήριων ραγών, εντός του φρέατος εκκίνησης, επάνω στις οποίες τοποθετούνται οι σωλήνες. Η διατήρηση της ακρίβειας της ευθυγράμμισης κατά τη διάρκεια της προώθησης, είναι απαραίτητη η χρήση μιας καθοδηγούμενης ασπίδας, η οποία πρέπει συχνά να ελέγχεται καθ' ύψος και διεύθυνση από σταθερή θέση αναφοράς. Για μικρού μήκους ή απλές ωθήσεις σωλήνων, αυτοί οι έλεγχοι μπορούν να διεξάγονται με χρήση συμβατικού τοπογραφικού εξοπλισμού. Ταχείες διανοίξεις και τεχνικές τηλεχειρισμού απαιτούν εξελιγμένα ηλεκτρονικά συστήματα καθοδήγησης χρησιμοποιώντας ένα συνδυασμό λέιζερ και οθόνη υπολογιστή.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι: μεγάλη αντοχή της επένδυσης, ελάχιστη διαταραχή της επιφάνειας, μικρότερος κίνδυνος καθιζήσεων, ελάχιστη απαίτηση επαναφοράς της επιφάνειας στην πρότερη κατάσταση, μειωμένη απαίτηση για εκτροπές αγωγών κοινής ωφέλειας στις αστικές περιοχές, ομαλό εσωτερικό φινίρισμα που δίνει καλή ροή νερού, μη απαίτηση για επόμενη επένδυση, σημαντικά λιγότεροι αρμοί σε σχέση με τη διάνοιξη με τόξα επένδυσης, παρεμπόδιση της διείσδυσης υπόγειων υδάτων με τη χρήση σωλήνων με σφραγισμένους αρμούς, σημαντική μείωση του κοινωνικού κόστους σε σύγκριση με την ανοιχτή εκσκαφή σε αστικές περιοχές, μειωμένη περιβαλλοντική διαταραχή.

Ο σχεδιασμός του έργου περιλαμβάνει αρχικά τη λειτουργικότητα, την οικονομία και την περιβαλλοντική αποδοχή του. Για ένα αποχετευτικό σύστημα η λειτουργικότητα γενικά περιλαμβάνει: (α) υδραυλικές απαιτήσεις, (β) προτιμώμενη διαδρομή, (γ) απαιτήσεις φρεατίων, (δ) βάθος, (ε) κλίση. Μετά την αποτίμηση τους, η μελέτη της διάνοιξης διέπεται από παράγοντες που περιλαμβάνουν: (α) συνθήκες εδάφους, (β) λεπτομέρειες για υπάρχουσες υπηρεσίες κοινής ωφελείας και υπόγειες κατασκευές, (γ) θέση φρεατίων και χώρων εργασίας, (δ) απαιτούμενα μήκη, (ε) διάμετρο αγωγού, (ς) οικονομικά.

9.2.1.3 Ανοχές στη χάραξη

Σε σταθερό, αυτοφερόμενο, ομοιογενές έδαφος, η επιτρεπόμενη ανοχή για σωλήνες εισόδου ανθρώπου είναι ±75 mm στη διεύθυνση και ±50 mm στο επίπεδο σε οποιοδήποτε σημείο της διάνοιξης. Για μικροσήραγγες, ανοχές ±25 mm στη διεύθυνση και στο επίπεδο είναι εφικτές. Ωστόσο, σε ορισμένες συνθήκες εδάφους, ιδιαίτερα σε ασταθές έδαφος και βράχο, αυτές οι ανοχές μπορεί να μην είναι εύκολα επιτεύξιμες. Σε αυτές τις περιπτώσεις, όπου μια τέτοια ή μια αυστηρότερη ανοχή πρέπει να επιτυγχάνεται, δύνανται να υιοθετηθούν μεγαλύτερες διάμετροι σωλήνων σε συνδυασμό με επανεπένδυση του ανάστροφου, ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή ανοχή στη χάραξη. Η προσαρμογή στη διεύθυνση και στο επίπεδο πρέπει να είναι προοδευτική ώστε να διασφαλίζεται ότι η γωνιακή απόκλιση σε κάθε μεμονωμένο αρμό, δεν ξεπερνάει τα επιτρεπτά όρια του παραγωγού των σωλήνων.

Στην περίπτωση των σωλήνων από χάλυβα, δεν χρησιμοποιείται κατευθυνόμενη ασπίδα στο πρόσθιο μέρος του αγωγού, παρά μόνο ένα κοπτικό άκρο, και ως εκ τούτου οι επιτρεπτές ανοχές δεν μπορούν να είναι εγγυημένες. Η τελική χάραξη εξαρτάται από τη δυσκαμψία του σωλήνα και τις συνθήκες εδάφους. Γενικά, επιτυγχάνεται μια ανοχή 1% του μήκους διάνοιξης και αυτή είναι γενικά αποδεκτή για αγωγούς πίεσης.

9.2.1.4 Παράγοντες επιλογής

Οι παράγοντες οι οποίοι πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου διάνοιξης είναι:

α) Η θέση του αγωγού. Συνήθως οι αγωγοί των δικτύων εξυπηρέτησης τοποθετούνται κάτω από δρόμους ή πεζοδρόμια, κοντά σε οικοδομικές κατασκευές. Στις περιπτώσεις αυτές οι κανονισμοί καθορίζουν ένα εύρος πλάτους ασφάλειας για κάθε αγωγό γύρω από τον οποίο δεν θα πρέπει να υπάρχει άλλος και θα πρέπει να αποκλεισθούν μέθοδοι όρυξης που ενδεχόμενα θα προκαλέσουν διαταραχές στο έδαφος.

β) Η διεύθυνση και η κλίση του αγωγού. Η διεύθυνση του αγωγού είναι ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος δεδομένου ότι οι καμπύλες δημιουργούν προβλήματα πορείας. Εν γένει τα δίκτυα σχεδιάζονται έτσι ώστε να αποτελούνται από ευθύγραμμα τμήματα με μόνες εξαιρέσεις κάποιες μεμονωμένες παρακάμψεις

που επιβάλλονται από εξωτερικές συνθήκες. Η κλίση του αγωγού είναι άρρηκτα συνδεμένη με την ικανότητα απορροής του (εφόσον πρόκειται για υδραυλικό έργο ροής με ελεύθερη επιφάνεια). Η τιμή της μέγιστης και της ελάχιστης κλίσης με την οποία πρέπει να κατασκευαστεί ένας αγωγός συνήθως καθορίζεται από κανονισμούς του κράτους όπου πρόκειται να κατασκευαστεί. Στην περίπτωση των αγωγών που λειτουργούν υπό πίεση η κλίση έχει σημασία μόνο για αποστράγγιση και για εργασίες συντήρησης.

Οι μέθοδοι διάνοιξης μικροσηράγγων παρέχουν τη δυνατότητα καμπύλης πορείας κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις. Κατά το σχεδιασμό μιας τέτοιας χάραξης πρέπει να ληφθούν υπόψη η ακτίνα καμπυλότητας, το μήκος και η διάμετρος των σωλήνων και η στεγανότητα των συνδέσμων των σωλήνων. Όσο αυξάνεται η διάμετρος του σωλήνα, αυξάνει και η ελάχιστη ακτίνα καμπυλότητας. Συνήθως η ακτίνα καμπυλότητας κυμαίνεται από 200 έως 300 m, ενώ για διαμέτρους από 600 έως 900 mm, η ακτίνα καμπυλότητας μπορεί να είναι 100 m.

γ) Η απόσταση μεταξύ των φρεάτων ελέγχου. Το ευθύγραμμο τμήμα του αγωγού μεταξύ δύο φρεάτων ελέγχου επιδιώκεται να είναι το μέγιστο δυνατό για οικονομία στις απαιτούμενες εκσκαφές. Τουλάχιστο, σε ότι αφορά τα υδραυλικά δίκτυα, σύμφωνα με τους κανονισμούς πολλών χωρών της Ευρώπης τα φρέατα αυτά είναι απαραίτητο να κατασκευάζονται σε προκαθορισμένες αποστάσεις και σε κάθε διατομή όπου θα υπάρξει αλλαγή κατεύθυνσης ή προβλέπονται διασταυρώσεις με άλλους αγωγούς του δικτύου. Για αγωγούς ονομαστικής διαμέτρου μικρότερης των 1200 mm το μήκος αυτό δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 50 - 70 m, ενώ για αγωγούς πάνω από 1200 mm δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 70 - 100 m.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η λειτουργία αυτών των φρεάτων δεν είναι μόνο ο έλεγχος των τμημάτων της σωλήνωσης, αλλά και ο καθαρισμός - συντήρηση. Οι τεχνικές διάνοιξης μικροσηράγγων αρχικά χρησιμοποιούν τα παραπάνω φρέατα ως φρέατα εισαγωγής και εξαγωγής του μηχανικού εξοπλισμού, τα οποία μετά το τέλος των εργασιών της όρυξης μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως συμβατικά φρέατα ελέγχου.

δ) Πάχος υπερκείμενου εδάφους. Το πάχος του υπερκειμένου εδάφους επιδιώκεται να είναι μικρό ώστε να περιορισθούν οι εκσκαφές κατά τις μεθόδους ανοικτής εκσκαφής. Ωστόσο, ένα ικανοποιητικό πάχος εδάφους πάνω από τον τοποθετούμενο αγωγό είναι απαραίτητο να υπάρχει ιδιαίτερα σε περιοχές όπου υπάρχουν κατασκευές, δρόμοι ή σιδηροδρομικές γραμμές, δηλαδή αναμένονται αυξημένες φορτίσεις. Διεθνώς, τα αποχετευτικά δίκτυα κατασκευάζονται σε βάθος από 2.5 έως 4.0 m, ενώ για άλλα δίκτυα, π.χ. φυσικού αερίου, το βάθος μπορεί να είναι μικρότερο. Το πάχος αυτό προτείνεται να είναι 2 φορές η διάμετρος της σωλήνωσης ή τουλάχιστον 1.2 m.

ε) Η διάμετρος της σωλήνωσης και το υλικό κατασκευής των σωλήνων. Η πλειονότητα των αποχετευτικών δικτύων στο μεγαλύτερο μήκος τους έχει ονομαστική διάμετρο μικρότερη από 800 mm και είναι επιδεκτική στην υιοθέτηση της τεχνολογίας διάνοιξης των μικροσηράγγων. Το υλικό κατασκευής των αγωγών δικτύων εξυπηρέτησης μπορεί να είναι ποικίλο (χυτοσίδηρος, χάλυβας, σκυρόδεμα, αργιλοπυρίτιο, PVC κ.α.) ανάλογα με τη χρήση του δικτύου η οποία μπορεί να είναι αποχέτευση, μεταφορά ρευστών ή φυσικού αερίου, καλώδια τηλεπικοινωνιών.

ς) Εδαφικές συνθήκες. Η γεωλογία του χώρου όπου πρόκειται να γίνει η κατασκευή, είναι μία από τις κυριότερες παραμέτρους που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Ιδιαίτερη σημασία έχει η ποιότητα του εδάφους, γιατί συνήθως οι αγωγοί των δικτύων τοποθετούνται σε βάθη που δεν ξεπερνούν τα 20 m, όπου σπάνια συναντάται συμπαγές πέτρωμα. Η έρευνα περιλαμβάνει γεωλογική χαρτογράφηση κατά μήκος του άξονα του αγωγού, γεωφυσικές διασκοπίσεις κατά μήκος του άξονα του αγωγού και γεωτρητική έρευνα. Οι γεωφυσικές διασκοπίσεις αποσκοπούν στην ανίχνευση φυσικών εμποδίων και γενικότερα στη δομή του υπεδάφους. Στις περιπτώσεις μικροσηράγγων εκείνο που ενδιαφέρει είναι η ανίχνευση των ήδη υπαρχόντων σωληνώσεων και βέβαια των βραχωδών εγκλεισμάτων τα οποία μπορεί να δημιουργήσουν σημαντικά προβλήματα κατά τη φάση της όρυξης. Οι γεωτρήσεις αποτελούν αναμφισβήτητα την πιο αποτελεσματική μέθοδο συλλογής πληροφοριών που αφορούν το υπέδαφος είτε ληφθεί αδιατάρακτο δείγμα είτε όχι. Όταν πραγματοποιούνται οι γεωτρήσεις αυτές, θα πρέπει να φτάνουν τουλάχιστο σε βάθος 2 έως 3 μέτρα κάτω από αυτό που προβλέπεται να φτάσει η σωλήνωση. Οι γεωτρήσεις πρέπει να γίνονται ανά 80 - 100 m και το σύνολο της πυρηνοληψίας να είναι 1.5 φορές το μήκος της μικροσήραγγας (Thomson, 1993). Οι εργαστηριακές δοκιμές αποσκοπούν στην κατάταξη του εδάφους και τον προσδιορισμό των φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών του. Στην περίπτωση που συναντηθούν πετρώματα θα πρέπει να γίνει υπολογισμός των παραμέτρων αντοχής του συμπαγούς πετρώματος και των ασυνεχειών, εκτίμηση της υδραυλικής περατότητας και της φυσικοχημικής συμπεριφοράς τους, και εκτίμηση με τη βοήθεια κάποιου κριτηρίου αστοχίας της εντατικής κατάστασης που είναι δυνατό να προκαλέσει αστοχία κάτω από τις συνθήκες που αναμένονται. Το υδρογεωλογικό καθεστώς είναι απαραίτητο να είναι γνωστό στον καλύτερο δυνατό βαθμό και ειδικότερα ενδιαφέρει το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα και

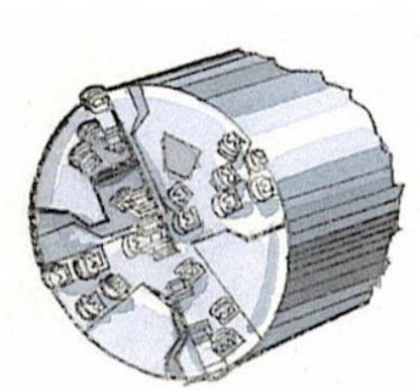
η ποσότητα του νερού, ο ρυθμός και η διεύθυνση ροής, ο χημισμός του υπεδαφικού νερού και η διαπερατότητα του εδάφους ή του πετρώματος.

9.2.2 Τα μέρη της διάνοιξης

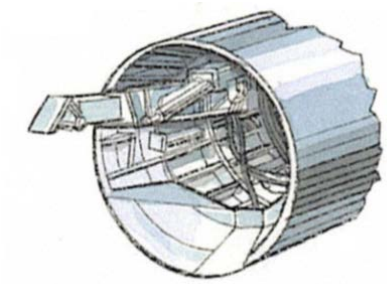
Κατά τη διαδικασία κατασκευής με οποιαδήποτε υπόγεια τεχνική ώθησης, διακρίνουμε τέσσερις επιμέρους περιοχές, ήτοι α) το μέτωπο, β) τη σωλήνωση, γ) το φρέαρ και δ) την επιφανειακή εγκατάσταση. Στο μέτωπο της σήραγγας πραγματοποιείται η εκσκαφή και ο έλεγχος της ευστάθειάς του, η φόρτωση και αποκομιδή των μπαζών, η τοπογραφική παρακολούθηση και η διόρθωση της πορείας. Η σωλήνωση κατά την κατασκευή προσφέρει: επένδυση στη σήραγγα, πρόσβαση των εργαζομένων στη μηχανή εκσκαφής, δίοδο μεταφοράς των μπαζών, μεταφορά του φορτίου των εμβόλων και δίοδο για τυχόν επισκευές. Κατά τη λειτουργία του έργου προσφέρει μόνιμη ανθεκτική και υδατοστεγανή επένδυση. Το φρέαρ φιλοξενεί τον εξοπλισμό προώθησης των σωλήνων, μεταφέρει ομοιόμορφα την ώθηση στη σωλήνα, αναλαμβάνει την αντίδραση στην ώθηση αυτή, χρησιμεύει ως χώρος καταβίβασης, τοποθέτησης και σύνδεσης των σωλήνων και αποκομιδής των μπαζών και προσφέρει μια βάση παρατήρησης και έναν ασφαλή χώρο εργασίας. Η επιφανειακή εγκατάσταση προσφέρει χώρο για το σταθμό ελέγχου καθώς και για ένα σύνολο μονάδων εξυπηρέτησης, όπως για επεξεργασία και αποκομιδή των μπαζών, για ηλεκτρική, υδραυλική ή πνευματική ισχύ, για εξοπλισμό μίξης λιπαντικών και ενεμάτων και για αποθήκευση και μεταφορά των σωληνώσεων.

9.2.2.1 Στήριξη και κοπή του μετώπου από ασπίδα

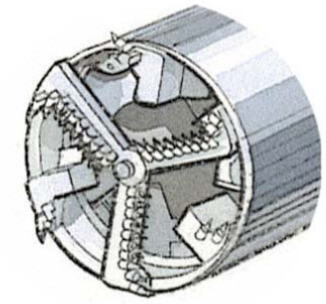
Οι μηχανές με ασπίδα αποτελούν την πιο προηγμένη κατηγορία διάνοιξης με ώθηση σωλήνων, και η τεχνολογία που υιοθετούν μοιάζει σε μεγάλο βαθμό με τις μηχανές ολομέτωπης κοπής (TBM, Grasso & Mahtab, 1995). Στις περισσότερες περιπτώσεις η επιλογή της μεθόδου εξαρτάται και από την επιλογή της κατάλληλης τεχνικής στήριξης της γεωμάζας. Οι μηχανές αυτές (Σχήμα 9-6) μπορούν να ταξινομηθούν στις εξής κατηγορίες:



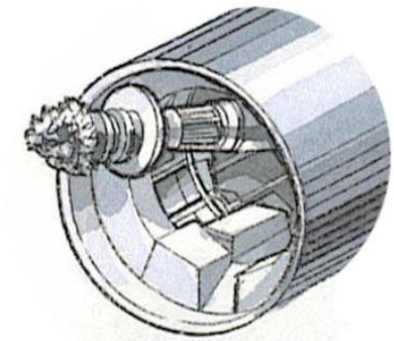
(α) Μηχανή σκληρού πετρώματος



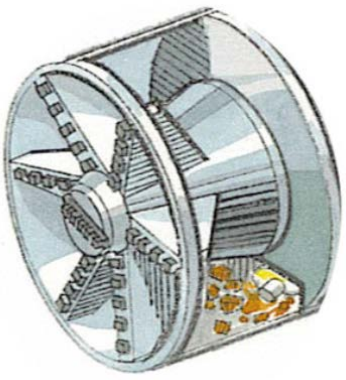
(β) Τσάπα ανοικτού μετώπου



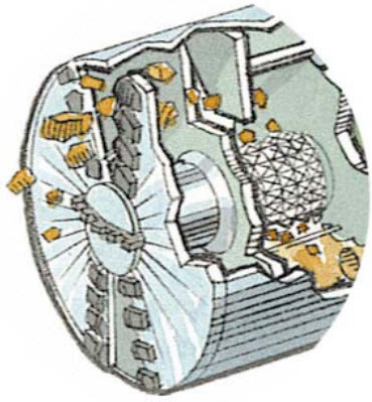
(γ) Μηχανή TBM



(δ) Φρέαζα ανοικτού μετώπου



(ε) Μηχανή EPB



(ς) Μηχανή πολφού

Σχήμα 9-6. Διάφοροι τύποι μηχανών

(α) Ανοικτή χειρωνακτική ασπίδα. Μία ανοικτού μετώπου ασπίδα στην οποία η εκσκαφή πραγματοποιείται χειρωνακτικά.
(β) Ασπίδα μετώπου μερικής κοπής του εδάφους με βραχίονα κοπής ή τσάπα.
(γ) Μηχανή ολομέτωπης διάτρησης σήραγγας (TBM). Μια ασπίδα που έχει μια περιστρεφόμενη κεφαλή κοπής του πετρώματος, στην οποία το πρόσθιο τμήμα μπορεί να είναι διαχωρισμένο από την υπόλοιπη ασπίδα με ένα διάφραγμα. Διατίθενται διάφορες κοπτικές κεφαλές που ταιριάζουν σε ένα ευρύ φάσμα εδαφικών συνθηκών.
(δ) Ολομέτωπης κοπής και αντιστάθμισης των πιέσεων του εδάφους και/ή του νερού στο μέτωπο με υπό πίεση αέρα ή νερό (water pressure balance) ή πολφό (slurry pressure balance - SPB) ή υλικό εκσκαφής (earth pressure balance - EPB) ή συνδυασμό των παραπάνω (MEPB).
(ε) Μηχανή μικροσήραγγας. Μια πλήρως καθοδηγούμενη ασπίδα, εξωτερικής διαμέτρου γενικά μικρότερης από ένα μέτρο, ελεγχόμενη πλήρως από χειριστή που βρίσκεται εκτός του αγωγού. Στην κατηγορία αυτή δύναται να συμπεριληφθεί ασπίδα με κοχλία σύγχρονης κοπής και αποκομιδής (directly driven auger bore).

Ο Πίνακας 9-1 δίνει στοιχεία για την καταλληλότητα των ασπίδων για ξηρές συνθήκες διάνοιξης και ο Πίνακας 9-2 για υγρές.

Πίνακας 9-1. Μέθοδοι ώθησης σωλήνων σε ξηρή γεωμάζα, συνεκτική, μη συνεκτική, μικτή και επίχωμα (PJA, 1995b)

Ασπίδα	Εσωτερική διάμετρος σωλήνα	Μήκος	Στήριξη μετώπου	Παρατηρήσεις
Ανοικτή χειρωνακτική ασπίδα	900 - 3000 mm	Γενικά έως 200 m	Θεώρηση σανίδων μετώπου	Υποκείμενη σε ενδιάμεσους σταθμούς ώθησης
Ασπίδα με βραχίονα κοπής	1350 - 3000 mm	Γενικά έως 500 m	-	Εφαρμόσιμη μόνον σε ισχυρά συνεκτικά εδάφη
Ασπίδα με τσάπα	1200 - 3000 mm	Γενικά έως 500 m	-	Υποκείμενη σε ενδιάμεσους ωστήρες, λίπανση, και οικονομικά
TBM	900 - 3000 mm	Γενικά έως 500 m	Περιλαμβάνεται στη μέθοδο	Υποκείμενη σε ενδιάμεσους ωστήρες, λίπανση, και οικονομικά
Ασπίδα πολφού	900 – 3000 mm	Γενικά έως 500 m	Περιλαμβάνεται στη μέθοδο	Υποκείμενη σε ενδιάμεσους ωστήρες, λίπανση, και οικονομικά
EPBM	900 – 3000 mm	Γενικά έως 500 m	Περιλαμβάνεται στη μέθοδο	Υποκείμενη σε ενδιάμεσους ωστήρες, λίπανση, και οικονομικά. Παρόμοια με TBM για εδάφη.
Πιεσμένου αέρα	-			Μη εφαρμόσιμη
Μικροσήραγγα	150 – 900 mm	Γενικά έως 250 m	Περιλαμβάνεται στη μέθοδο	Υποκείμενη σε ενδιάμεσους ωστήρες, λίπανση, οικονομικά και συστήματα καθοδήγησης

Πίνακας 9-2. Μέθοδοι ώθησης σωλήνων σε υγρή γεωμάζα, συνεκτική, μη συνεκτική, μικτή και επίχωμα (PJA, 1995b)

Ασπίδα	Εσωτερική διάμετρος σωλήνα	Μήκος	Στήριξη μετώπου	Παρατηρήσεις
Ανοικτή χειρωνακτική ασπίδα	900 - 3000 mm	Γενικά έως 200 m	Χημική σταθεροποίηση Εναιωρήματα Σημειακές πηγές Βαθιές πηγές	Υποκείμενο στις εδαφικές συνθήκες, βάθος, ενδιάμεσους ωστήρες, λίπανση και οικονομικά
Ασπίδα με βραχίονα κοπής	-	-	-	Μη εφαρμόσιμη
Ασπίδα με τσάπα	1200 - 3000 mm	Γενικά έως 500 m	Χημική σταθεροποίηση Εναιωρήματα Σημειακές πηγές Βαθιές πηγές	Υποκείμενο στις εδαφικές συνθήκες, βάθος, ενδιάμεσους ωστήρες, λίπανση και οικονομικά
TBM	900 - 3000 mm	Γενικά έως 500 m	Χημική σταθεροποίηση Εναιωρήματα Σημειακές πηγές Βαθιές πηγές	Υποκείμενο στις εδαφικές συνθήκες, βάθος, ενδιάμεσους ωστήρες, λίπανση και οικονομικά
Μηχανή πολφού	900 – 3000 mm	Γενικά έως 500 m	Ενσωματωμένη μέθοδος	Υποκείμενο στους ενδιάμεσους ωστήρες, λίπανση και οικονομικά
EPBM	900 – 3000 mm	Γενικά έως 500 m	Μερικώς ενσωματωμένη, και Χημική σταθεροποίηση Εναιωρήματα Σημειακές πηγές Βαθιές πηγές	Υποκείμενο στο πιεζομετρικό ύψος του νερού, ενδιάμεσους ωστήρες, λίπανση και οικονομικά
Πιεσμένου αέρα	2000 – 3000 mm	Γενικά έως 500 m	Ενσωματωμένη μέθοδος	Υποκείμενο στους ενδιάμεσους ωστήρες, λίπανση και οικονομικά
Μικροσηραγγοποιία	150 – 900 mm	Γενικά έως 250 m	Εξαρτάται από τον τύπο της μηχανής	Υποκείμενο στους ενδιάμεσους ωστήρες, λίπανση, οικονομικά και συστήματα καθοδήγησης

ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ

(α) Συνολικά μήκη μεταξύ των φρεάτων μπορούν να αυξηθούν με την ώθηση σωλήνων από τον ένα προς τον άλλον και την ένωση τους υπόγεια.

(β) Κατά την επιλογή μηχανής ολομέτωπης κοπής, πρέπει να εξετάζεται η ικανότητα της μηχανής να αντιμετωπίζει την κοκκομετρική διαβάθμιση, τις κροκάλες, τους ογκόλιθους, ή οποιαδήποτε άλλα εμπόδια.

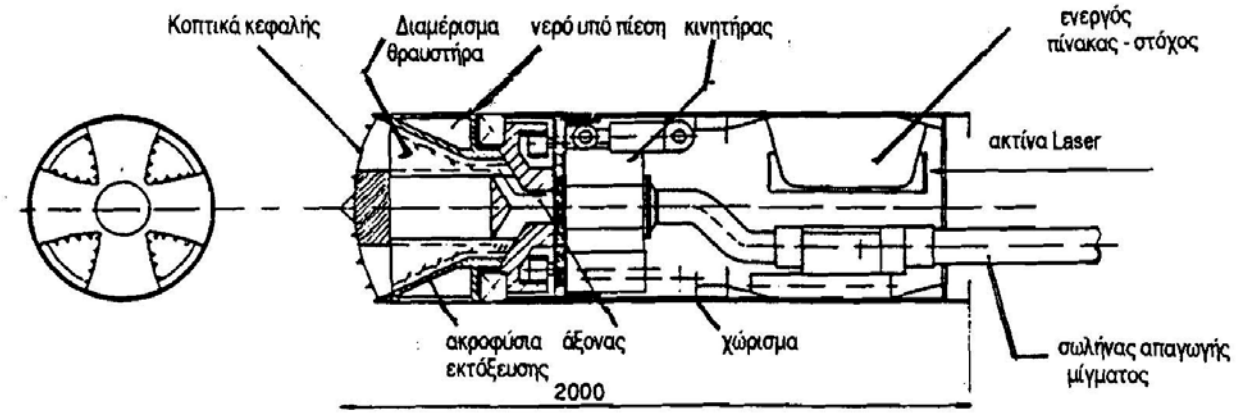
γ) Σε συνεκτικά υλικά, η απόρριψή των μπαζών από μηχανές πολφού μπορεί να απαιτεί ειδικές εγκαταστάσεις διαχείρισης και διάθεσης στα φρέατα εργασίας.

(δ) Το πέτρωμα μπορεί να εκσκαφθεί χρησιμοποιώντας ασπίδα με βραχίονα κοπής, ένα ολομέτωπο TBM, μία μηχανή μικροσήραγγας ή μία ασπίδα ανοικτού μετώπου σε συνδυασμό με θραυστήρες ή μεθόδους ανατίναξης.

(ε) Πρέπει να δοθεί προσοχή στη σταθεροποίηση γύρω από την είσοδο της σωλήνωσης και τα μάτια εξόδου στα φρέατα. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με μια σειρά μεθόδων, για παράδειγμα, υποβιβάζοντας το επίπεδο του νερού ή με τσιμεντενέσεις.

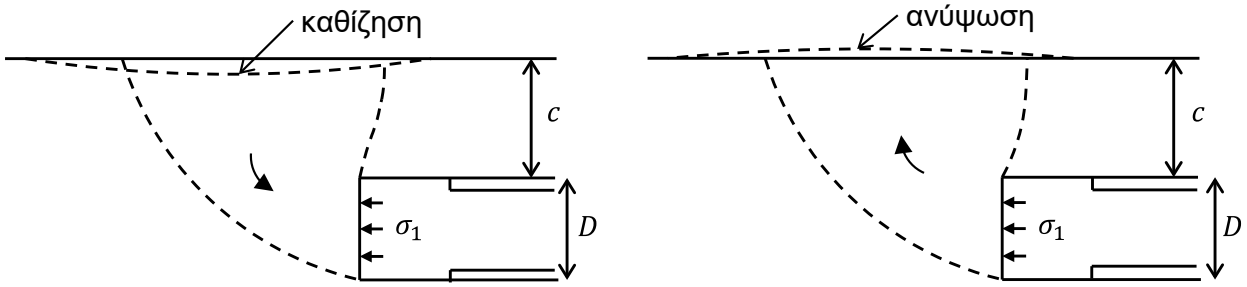
Η ύπαρξη πετρώματος ή κροκάλων εντός του εδάφους μπορεί να αποτελέσει ανασταλτικό παράγοντα για την ομαλή πορεία της μηχανής. Οι συνήθεις μηχανές μπορούν να αντιμετωπίσουν κροκάλες μεγέθους της τάξης των 30 - 60 mm. Για τέτοια μικρά μεγέθη χαλικιών πολλές φορές είναι πιο οικονομικό να τοποθετείται πίσω από την κοπτική κεφαλή κάποιο είδος κόσκινου ώστε να γίνεται διαχωρισμός των αδρομερών τεμαχίων (Moss, 1993). Για μεγαλύτερες κροκάλες γίνεται είτε κατάλληλη διαμόρφωση της κοπτικής κεφαλής και /ή των κοπτικών είτε τοποθέτηση θραυστήρα πίσω ακριβώς από την κοπτική κεφαλή (Σχήμα 9-7). Η ύπαρξη του θραυστήρα έχει αποδειχθεί αρκετά αποτελεσματική αφού μπορεί να αντεπεξέλθει σε μεγέθη κροκάλων που

φτάνουν το 30% του μεγέθους της διαμέτρου της ασπίδας (Iseley, 1991). Στην περίπτωση ιδιαίτερα μαλακών συνεκτικών εδαφών ή διογκούμενων πετρωμάτων υπάρχει περίπτωση να απαιτείται προενίσχυση ή κάποια μέθοδος βελτίωσης του υπεδάφους ώστε ο αγωγός που προβλέπεται να κατασκευαστεί να μη δημιουργεί προβλήματα στις παρακείμενες κατασκευές. Για τη λειτουργία του εξοπλισμού απαιτούνται 3 ή 4 εργαζόμενοι, ενώ για τη συναρμολόγηση και αποσυναρμολόγηση μηχανής διαμέτρου 600 mm απαιτείται χρονικό διάστημα περίπου 6 και 4 εργατικών ημερών αντίστοιχα (Benett et al., 1993).



Σχήμα 9-7. Μηχανή AVN με θραυστήρα πίσω από την κοπτική κεφαλή, (Herrenknecht Tunnelvortriebstechnik. Microtunnelling machines)

Η πίεση που ασκείται στο μέτωπο θα πρέπει να είναι (Σχήμα 9-8) μεγαλύτερη της ενεργητικής ώστε να αποφεύγεται κατάρρευση του μετώπου και μικρότερη της παθητικής ώστε να αποφεύγεται ανύψωση ή και εκτίναξη του εδάφους στην επίγεια επιφάνεια.



Ενεργητική αστάθεια μετώπου σήραγγας λόγω μη επαρκούς πίεσης μετώπου

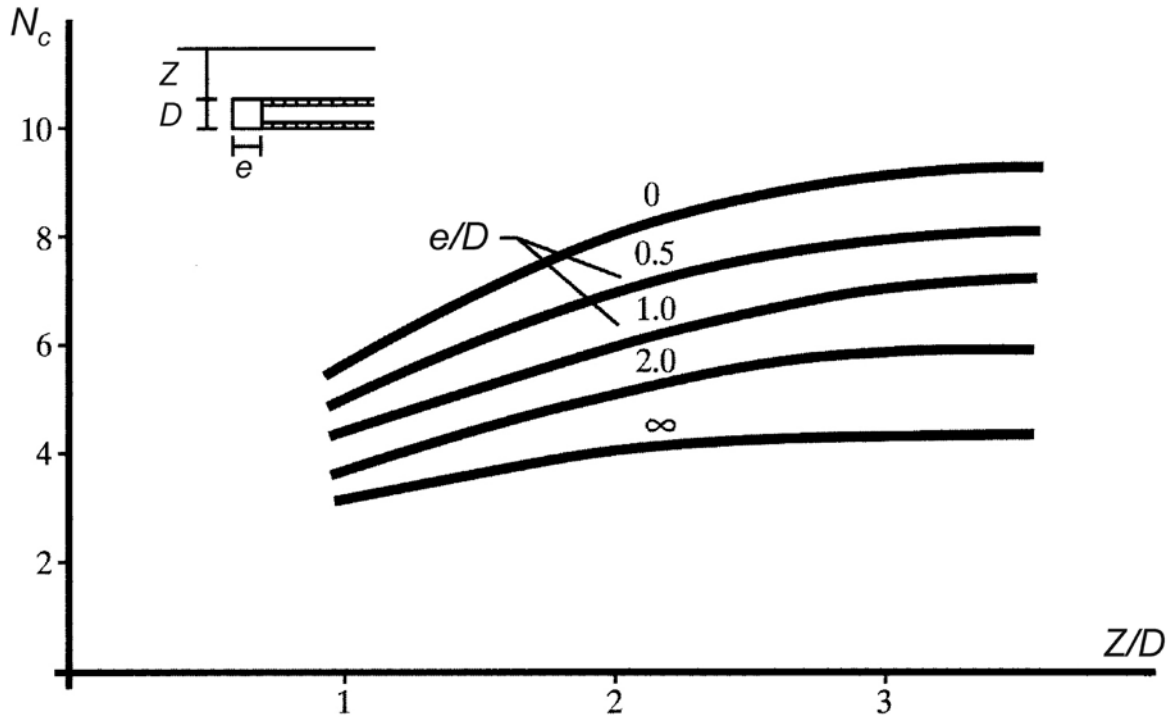
Παθητική αστάθεια μετώπου σήραγγας λόγω υπερβολικής πίεσης μετώπου

Σχήμα 9-8. Ενεργητική και παθητική αστοχία του μετώπου

Σε κορεσμένα αργιλικά εδάφη η βραχυχρόνια ευστάθεια του εδάφους, εξαρτάται από το σχετικό βάθος Z/D και τον συντελεστή ευστάθειας N_c που δίνεται από το διάγραμμα στο Σχήμα 9-9. Η απαιτούμενη πίεση στήριξης θα πρέπει να βρίσκεται μεταξύ της ενεργητικής και της παθητικής, σύμφωνα με την:

$$\gamma \cdot \left(Z + \frac{D}{2}\right) - N_c \cdot c_u \leq p_a \leq \gamma \cdot \left(Z + \frac{D}{2}\right) + N_c \cdot c_u \tag{9-1}$$

όπου γ η πυκνότητα βάρους, c_u η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους και p_a η πίεση αντιστήριξης του μετώπου. Η επίδραση της διήθησης του νερού στην ευστάθεια του μετώπου μελετήθηκε από τους Pellet et al. (1993).



Σχήμα 9-9. Συντελεστής ευστάθειας για συνεκτικό έδαφος (Atkinson & Mair, 1981)

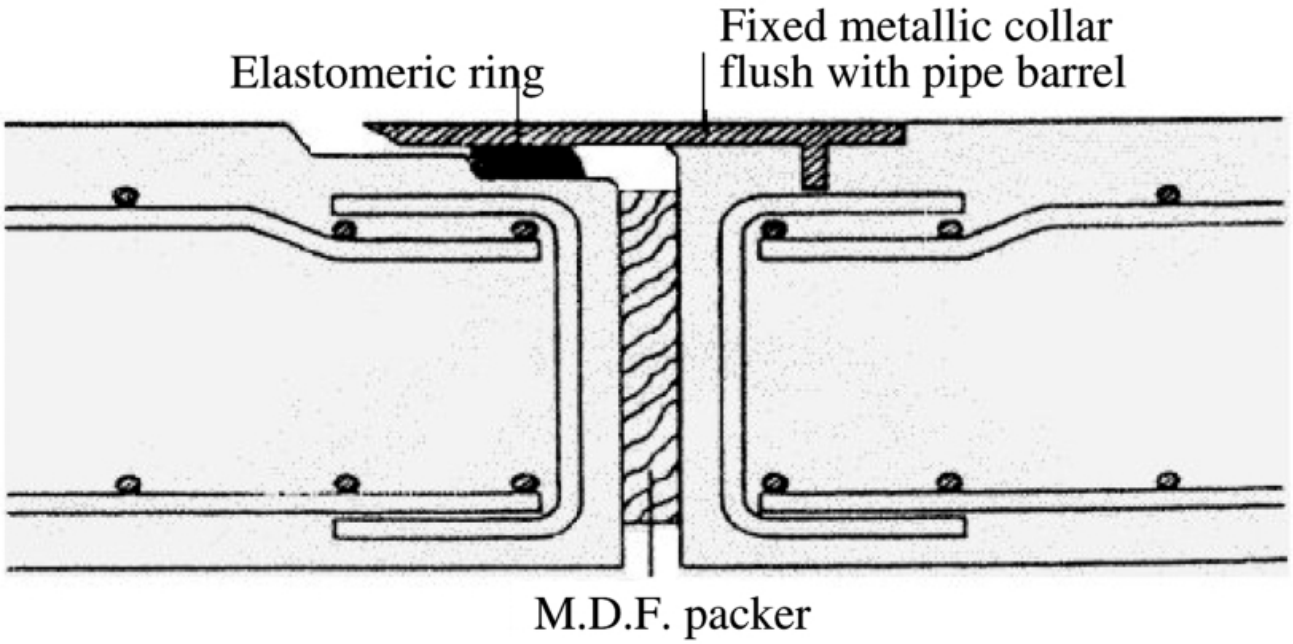
9.2.2.2 Σωλήνες

Οι σωλήνες που χρησιμοποιούνται στις μεθόδους όρυξης μικροσηράγγων είναι ειδικής κατασκευής γιατί κατά την τοποθέτησή τους υφίστανται ισχυρές φορτίσεις, ιδίως στην περιοχή των αρμών τους. Το μήκος των σωλήνων καθορίζεται από έναν αριθμό παραγόντων από τους οποίους ορισμένοι είναι ασυμβίβαστοι μεταξύ τους. Έτσι, ενώ από τη μια πλευρά απαιτούνται μεγάλα μήκη ώστε να μειώνεται ο αριθμός των αρμών και κατ' επέκταση ο κίνδυνος των απωλειών, από την άλλη μικρά μήκη είναι προτιμότερα γιατί επιτρέπουν την κατασκευή μικρών διαστάσεων φρεάτων. Συνήθως, το μήκος των σωλήνων κυμαίνεται από 1.0 έως 5.0 m, ανάλογα με τη διάμετρο, το υλικό του σωλήνα και τη χρήση για την οποία προορίζεται.

Γενικά, οι σωλήνες που χρησιμοποιούνται στις μεθόδους διάνοιξης μικροσηράγγων είναι προκατασκευασμένοι. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή του υλικού σωλήνων για τους αγωγούς αποχέτευσης, ιδιαίτερα των ακάθαρτων, είναι το κόστος αγοράς, η διάρκεια ζωής και η αντοχή σε μηχανική και χημική διάβρωση, η αντοχή σε μηχανική καταπόνηση, ο τύπος αρμών, η στεγανότητα που μπορεί να επιτευχθεί, το βάρος και η ταχύτητα σύνδεσης. Το σκυρόδεμα είναι το πιο κοινό υλικό που χρησιμοποιείται για τους σωλήνες, με τις διαμέτρους τους να κυμαίνονται από 300mm έως 3000mm ή και μεγαλύτερες εάν απαιτείται. Ωστόσο, χρησιμοποιούνται επίσης σωλήνες από χάλυβα, οπλισμένο πλαστικό (grp), και, στις μικρότερες διαμέτρους, από υαλοποιημένη άργιλο. Η επιλογή του υλικού μπορεί να επηρεάζεται από τη διάμετρο, το μήκος της διάνοιξης, και σε ορισμένες περιπτώσεις, από τις συνθήκες εδάφους ή την προβλεπόμενη τελική χρήση του αγωγού. Σωλήνες σύνθετης κατασκευής, για παράδειγμα από σκυρόδεμα και grp, έχουν παραχθεί για να αντιμετωπίσουν ιδιαίτερες συνθήκες. Η πλειονότητα των σωλήνων είναι για αποχέτευση ή αποστράγγιση και τέτοια έργα συνήθως περιλαμβάνουν σωλήνες σκυροδέματος για διαμέτρους εισόδου ανθρώπων και σκυροδέματος ή αργίλου στα μεγέθη μικροσηράγγων. Ειδικότερα παρασκευάζονται:

α) Σωλήνες από σκυρόδεμα. Το σκυρόδεμα μπορεί να είναι άοπλο ή οπλισμένο με ποικιλία σε εσωτερικές διαμέτρους από 250 έως και πάνω από 3000 mm. Για διαμέτρους πάνω από 900mm οι σωλήνες είναι γενικά διαθέσιμοι σε μήκη μεταξύ 1.2 και 2.5 m, ενώ για τις συνήθεις μικροσήραγγες διαμέτρου μικρότερης των 900 mm, το μήκος τους κυμαίνεται από 1.0 έως 2.5 m. Για την ικανοποίηση των απαιτήσεων αντοχής λόγω της φόρτισης που υφίστανται κατά την προώθηση αλλά και κατά τη λειτουργία τους, το σκυρόδεμα πρέπει να είναι υψηλής αντοχής. Η προσθήκη του οπλισμού ή των μεταλλικών ινών (fibres) βελτιώνει τη συμπεριφορά τους και αυξάνει την πλαστιμότητά τους.

Η στεγανότητα εξασφαλίζεται με ελαστικούς δακτυλίους στεγάνωσης. Οι αρμοί (Σχήμα 9-10) μπορεί να είναι είτε με εντομή (butt/rebated joints) είτε εφαρμοστοί. Οι τελευταίοι τείνουν να επικρατήσουν επειδή μπορούν να μεταβιβάζουν μεγάλο μέρος του αξονικού φορτίου προώθησης. Η αντοχή στη φθορά και κατά συνέπεια η αύξηση της ωφέλιμης ζωής του σωλήνα εξασφαλίζεται με κατάλληλη ποιότητα σκυροδέματος.



Σχήμα 9-10. Διαμόρφωση αρμών (CANZIAN, 2001)

Αντιδιαβρωτική προστασία επιτυγχάνεται με κατάλληλης σύνθεσης τσιμέντο, υψηλής αντοχής σε θειικά. Στην περίπτωση όπου το εσωτερικό περιβάλλον είναι έντονα διαβρωτικό (p.H. < 3.5) πρέπει να επικαλύπτεται με κατάλληλα υλικά, όπως άσφαλτο, ανθρακόπισσα, ρητίνες βυνιλίου ή εποξεικές, ουρεθάνες, πολυαιθυλένιο (PE) ή PVC. Στην περίπτωση διαβρωτικών εδαφών μπορεί να γίνει εξωτερική επικάλυψη με τσιμεντοκονία και μονωτικό υλικό καθώς και με φύλλα ή πλακίδια από πλαστικοποιημένο PVC ή PE.

Χρησιμοποιούνται επίσης σωλήνες από οπλισμένο σκυρόδεμα οι οποίοι είναι εσωτερικά επενδυμένοι με σωλήνα PVC ή GRP. Τέλος, υπάρχουν και σωλήνες από οπλισμένο σκυρόδεμα με επένδυση από χυτοσίδηρο που έχει επικάλυψη από αντιδιαβρωτικό υλικό. Τα πλεονεκτήματα των σωλήνων από σκυρόδεμα είναι η ευκολία κατασκευής τους, το χαμηλό κόστος ιδίως στις μεγάλες διαμέτρους, η ικανοποιητική αντοχή τους και η μεγάλη ποικιλία διαμέτρων. Τα μειονεκτήματά τους είναι το υψηλό τους βάρος και η περιορισμένη αντοχή στη χημική διάβρωση εάν δε ληφθούν πρόσθετα μέτρα.

β) Σωλήνες αμιαντοτσιμέντου. Οι σωλήνες αυτού του είδους παράγονται με ανάμιξη τσιμέντου και ινών αμιάντου, οι οποίες προσδίδουν εφελκυστική αντοχή στο υλικό. Προσφέρονται σε εσωτερικές διαμέτρους από 200 έως 2000 mm, σε μήκη από 1000 έως 5000 mm, μέτρο ελαστικότητας 23 GPa, και μέση μονοαξονική αντοχή σε θλίψη 65 MPa. Κατά τα άλλα, διατηρούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των τσιμεντοσωλήνων.

γ) Αργιλοπυριτικοί σωλήνες (υαλοποιημένης αργίλου). Παράγονται σύμφωνα με το BS 65: 1988, και τα κύρια συστατικά τους είναι Al_2O_3 και SiO_2. Διατίθενται συνήθως σε εσωτερικές διαμέτρους 150 έως 600 mm. Τα μήκη είναι συνήθως από 1.0 έως 1.2 m για τις συνήθεις διαμέτρους. Η αντοχή σε θλίψη είναι 100 έως 200 MPa, η αντοχή σε εφελκυσμό 10 έως 20 MPa, το μέτρο ελαστικότητας 50 GPa και η σκληρότητα στην κλίμακα Mohs 7. Οι αργιλοπυριτικοί σωλήνες έχουν πολύ υψηλή αντοχή στη μηχανική και στη χημική διάβρωση (εκτός αν υπάρχει HF). Έχουν πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες αλλά είναι εύθραυστοι και σχετικά ακριβοί. Η στεγανότητά τους εξασφαλίζεται με κατάλληλα παρεμβύσματα στα άκρα και έναν ελαστικό δακτύλιο.

δ) Πλαστικοί σωλήνες. Οι πλαστικοί σωλήνες από σκληρό PVC γρήγορα κυριάρχησαν στις μικρές διαμέτρους σωλήνων (< 400 mm), ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια που βελτιώθηκαν σημαντικά οι ιδιότητές τους. Τα πλεονεκτήματά τους είναι το χαμηλό βάρος, η ικανοποιητική στεγανότητα και η αντοχή τους σε χημική διάβρωση. Στα μειονεκτήματά τους περιλαμβάνονται τα λεπτά τους τοιχώματα και η μικρή τους αντοχή σε μηχανική καταπόνηση. Επίσης, επηρεάζονται από τις θερμοκρασιακές μεταβολές και παρουσιάζουν

γήρανση του πλαστικού. Οι ινοπλισμένοι πλαστικοί (glass fibre reinforced plastic - GRP) αποτελούνται από αλλεπάλληλα στρώματα ειδικά διαμορφωμένου πλαστικού διαφορετικής σύνθεσης. Ο πιο γνωστός οίκος είναι ο Hobas Durotech Gmbh, ο οποίος κατασκευάζει σωλήνες μεγέθους εξωτερικής διαμέτρου από 272 έως 2047 mm, δίδοντας παράλληλα σε πίνακες και την ωφέλιμη δύναμη προώθησης ανάλογα με το πάχος του τοιχώματος του σωλήνα.

ε) Μεταλλικοί σωλήνες. Οι μεταλλικοί σωλήνες (από χυτοσίδηρο, χυτοχάλυβα, χάλυβα) χρησιμοποιούνται σε πολλών ειδών δίκτυα. Οι χαλυβοσωλήνες παράγονται σε μεγάλη ποικιλία διαμέτρων. Το μήκος μπορεί να καθορισθεί σε ευρέα όρια, εφόσον η σύνδεση γίνεται με συγκόλληση ηλεκτρικού τόξου. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η επιμελημένη και προσεκτική συγκόλληση των σωλήνων είναι κεφαλαιώδους σημασίας για τη μακροζωία τους, γιατί τα σημεία αυτά είναι ευαίσθητα με αυξημένο κίνδυνο ψαθυρής θραύσης και έναρξης διαβρωτικών φαινομένων. Γενικά, οι σωλήνες από χάλυβα δεν είναι ανθεκτικοί στη χημική δράση και αυτός είναι ο κύριος λόγος που δε χρησιμοποιούνται σε δίκτυα λυμάτων. Όπου απαιτείται, η εσωτερική προστασία τους επιτυγχάνεται με προστατευτική στρώση από φυγοκεντρισμένη τσιμεντοκονία. Η εξωτερική προστασία έναντι διαβρωτικού εδάφους μπορεί να γίνει με επικάλυψη από ασφαλτικό υλικό, πιλήματα από ίνες γυαλιού ή πολυαιθυλένιο. Παρ' όλα αυτά, σε απροστάτευτα σημεία σε υγρό διαβρωτικό περιβάλλον ο σωλήνας μπορεί να λειτουργήσει ως άνοδος αποβάλλοντας μεταλλικά ιόντα, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα τη γρήγορη διάβρωση του σωλήνα. Για την παρεμπόδιση της διάβρωσης χρησιμοποιούνται συχνά ειδικές τεχνικές μετατροπής του χάλυβα σε κάθοδο.

9.2.2.3 Φρέατα εκκίνησης και άφιξης

Για την εφαρμογή των μεθόδων διάνοιξης μικροσηράγγων απαιτείται η όρυξη και η κατασκευή του φρέατος (pit / shaft / manhole) εισόδου ή εκκίνησης (starting / launching / jacking) (Σχήμα 9-11) και του φρέατος εξόδου ή άφιξης (target / reception). Εάν το συνολικό μήκος της διάνοιξης είναι μεγαλύτερο από την απόσταση που μπορεί να αντεπεξέλθει το μηχάνημα χωρίς διακοπή, τότε το μήκος αυτό χωρίζεται και κατασκευάζονται και άλλα ενδιάμεσα φρέατα. Ανάλογα με τον τύπο του έργου επιλέγονται η θέση των φρεάτων και ο απαιτούμενος αριθμός τους, το σχήμα, οι διαστάσεις τους και η τεχνική κατασκευής και επένδυσης των παρειών. Η θέση των φρεάτων επιλέγεται πάνω στον άξονα της χάραξης του αγωγού έχοντας κατά νου ότι επιδιώκεται η ελάχιστη δυνατή επιφανειακή όχληση. Γενικά, επειδή το κόστος κατασκευής είναι υψηλό, επιδιώκεται η μέγιστη δυνατή απόσταση μεταξύ των φρεάτων, εκτός από την περίπτωση που τα φρέατα χρησιμοποιούνται και μετά τις εργασίες όρυξης για τη συντήρηση και τον έλεγχο των αγωγών, οπότε η απόσταση τους δεν μπορεί να είναι πολύ μεγάλη (< 150 m). Η συνήθης απόσταση μεταξύ φρέατος εισόδου και εξόδου είναι 100 m (Thomson, 1993), όμως αν οι εδαφικές συνθήκες το επιτρέπουν το μήκος της διάνοιξης μπορεί να φθάσει τα 1000 m με την προϋπόθεση της αυστηρής τήρησης της προκαθορισμένης πορείας.



(α) Φρέαρ εισόδου του εξοπλισμού, (Soltau GmbH, Microtunnelling Systems)



(β) Κατασκευή της πλάκας αντίδρασης στο βάθος του φρέατος (Sofianos et al. 2004)

Σχήμα 9-11. Φρέατα εισόδου

Το σχήμα των φρεάτων είναι κύκλος ή παραλληλόγραμμο. Τα φρέατα εκκίνησης είναι μεγαλύτερα από τα φρέατα άφιξης, και τα μήκη τους, ανάλογα με τη μέθοδο και τις διαστάσεις του αγωγού, ξεκινούν από τα 2 m και ορισμένες φορές ξεπερνούν τα 8 m. Τα τελευταία χρόνια τείνει να επικρατήσει το κυκλικό σχήμα, επειδή επιτρέπει την εκτέλεση της όρυξης προς κάθε κατεύθυνση. Τα φρέατα μπορεί να είναι ανεπένδυτα με

ή χωρίς αντιστήριξη, επενδυμένα με ανακτήσιμα στοιχεία ή επενδυμένα με μόνιμης κατασκευής στοιχεία. Ο τύπος της επένδυσης εξαρτάται από τη μέθοδο διάνοιξης, την αντοχή του εδάφους σε συνδυασμό με την ύπαρξη νερού και το εντατικό πεδίο. Για τη διάνοιξη αγωγών μικρών διαμέτρων και μικρών αποστάσεων δεν απαιτείται επένδυση. Αντίθετα, οι μέθοδοι προώθησης απαιτούν επένδυση συμπαγή και ανθεκτική για να μπορέσει να αντεπεξέλθει στις υψηλές δυνάμεις προώθησης που αναπτύσσονται και μεταβιβάζονται στο τοίχωμα.

Οι εδαφικές συνθήκες είναι ο κύριος παράγοντας που καθορίζει την επιλογή της επένδυσης. Ασταθή ή χαμηλής αντοχής εδάφη απαιτούν οπωσδήποτε ισχυρό τύπο επένδυσης που να παρέχει και αντιστήριξη των τοιχωμάτων, σε αντίθεση με συνεκτικά πετρώματα στα οποία δεν είναι απαραίτητη η ισχυρή επένδυση. Η παρουσία νερού επιβάλλει αντλήσεις περιμετρικά του φρέατος ή υδατοστεγανή επένδυση σε συνδυασμό με τη σκυροδέτηση του πυθμένα του φρέατος. Το τελευταίο είναι απαραίτητο στην περίπτωση όπου διαπερατά εδάφη αποτελούν τον πυθμένα του φρέατος και υπάρχει κίνδυνος θραύσης του πυθμένα από ταχεία εισροή νερού μετά την άντληση των νερών που έχουν εισρεύσει στο εσωτερικό του φρέατος. Αν η αντοχή του εδάφους δεν είναι ικανοποιητική, απαιτούνται επιπλέον μέτρα ενίσχυσης και βελτίωσης του εδάφους. Επειδή το βάθος εφαρμογής των μεθόδων αυτών δεν ξεπερνά τα 20 m, η συμβολή του γήινου εντατικού πεδίου είναι μικρή έως αμελητέα. Πολύ πιο σημαντική είναι επίδραση των επιπρόσθετων στατικών ή κινητών φορτίων λόγω παρακειμένων κτιρίων και κυκλοφορίας τροχοφόρων οχημάτων. Όσον αφορά την αντοχή των γεωμαζών, στα μεν εδάφη ενδιαφέρει κυρίως η ενεργητική και η παθητική ώθηση που μπορούν να αναπτύξουν, ενώ στα πετρώματα η διατμητική αντοχή τους και κυρίως η συμπεριφορά των ασυνεχειών.

Πίνακας 9-3. Σχεδιασμός φρεάτων εργασίας σε ξηρή γεωμάζα, συνεκτική, μη συνεκτική, μικτή και επίχωμα (PJA, 1995b)

Τύπος	Μέγεθος και μορφή	Βάθος	Βελτίωση	Παρατηρήσεις
Τόξα προκατασκευασμένα	>2.4 m διάμετρος	Απεριόριστο	Δεν απαιτείται	Η διάμετρος εξαρτάται από τη μέθοδο και το συγκρότημα προώθησης
Πασσαλοσανίδες	Οποιοδήποτε	Έως 15 m	Δεν απαιτείται	Το μέγεθος και η μορφή εξαρτώνται από τη μέθοδο και το συγκρότημα προώθησης
Τεμνόμενοι πάσσαλοι	Οποιοδήποτε	Έως 20 m	Δεν απαιτείται	Το μέγεθος και η μορφή εξαρτώνται από τη μέθοδο και το συγκρότημα προώθησης
Επενδυμένη τάφρος	Οποιοδήποτε	Έως 6 m	Δεν απαιτείται	Το μέγεθος και η μορφή εξαρτώνται από τη μέθοδο και το συγκρότημα προώθησης
Προκατασκευασμένα κιβώτια	2-3 m διάμετρος	Έως 10 m	Δεν απαιτείται	Κατάλληλη για μικροσήραγγες
Επιτόπου έγχυτα κιβώτια	-	-	-	Δεν εφαρμόζεται
Εκσκαφή με αντηρίδες	Οποιοδήποτε	Αβαθής	Απαιτείται, εφόσον ξεπερνιέται η γωνία φυσικού πρανούς	Για αβαθή εργασία μόνο
Αγκυρώσεις γεωμάζας	Οποιοδήποτε	Επίπεδο επιφάνειας	Δεν απαιτείται	Χρησιμοποιείται γενικά για διανοίξεις μέσα από επιχώματα

Για την κατασκευή των φρεάτων εργασίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα εύρος επενδύσεων αντιστήριξης, όπως πχ. επένδυση από προκατασκευασμένα τόξα, ή από προκατασκευασμένα ή επιτόπου έγχυτα κιβώτια, ή από πασσαλοσανίδες ή τεμνόμενους πασσάλους. Η επένδυση με κιβώτια χρησιμοποιείται όλο και

πιο πολύ σε υδροφόρα εδάφη, ιδιαίτερα όταν συνδυάζεται με την κατασκευή κυκλικών φρεάτων. Τα στοιχεία είναι συνήθως δακτύλιοι από οπλισμένο σκυρόδεμα μήκους 1000 - 1500 mm. Ο κατώτερος δακτύλιος φέρει στην κάτω περιφέρεια μια κοπτική αιχμή που εισχωρεί στο έδαφος από το βάρος του δακτυλίου, ενώ ταυτόχρονα εκσκάπτεται το υλικό που βρίσκεται εντός αυτού. Για τη μείωση των δυνάμεων τριβής που αναπτύσσονται μεταξύ του εδάφους και των δακτυλίων χρησιμοποιούνται θιξοτροπικά ρευστά. Στη συνέχεια επαναλαμβάνεται ο κύκλος εκσκαφή - τοποθέτηση (των υπόλοιπων δακτυλίων) μέχρι το προβλεπόμενο βάθος. Η σύνδεση των στοιχείων πρέπει να είναι επιμελημένη και υδατοστεγής. Στη συνέχεια, σκυροδετείται υποβρυχίως ο πυθμένας και κατόπιν αντλείται το νερό που υπάρχει εντός του φρέατος.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορεί να απαιτείται βελτίωση ή στήριξη του εδάφους προκειμένου να προχωρήσει η όρυξη του φρέατος, όπως: άντληση από πηγάδια, πιεσμένος αέρας, εναιωρήματα, χημική σταθεροποίηση, κατάψυξη εδάφους. Ο Πίνακας 9-3 και ο Πίνακας 9-4 παρέχουν γενικές οδηγίες για την επιλογή της μεθόδου κατασκευής φρεάτων, σε ξηρές και υγρές γεωμάζες, αντίστοιχα..

Πίνακας 9-4. Σχεδιασμός φρεάτων εργασίας σε υγρή γεωμάζα, συνεκτική, μη συνεκτική, μικτή και επίχωμα (PJA, 1995b)

Τύπος	Μέγεθος και μορφή	Βάθος	Βελτίωση	Παρατηρήσεις
Τόξα προκατασκευασμένα	>2.4 m διάμετρος	Περιορίζεται από τη βελτίωση του εδάφους	Αποστράγγιση με Σημειακές πηγές Βαθιές πηγές Κιβώτια Πιεσμένος αέρας Εναιώρημα Χημική σταθεροποίηση Κατάψυξη	 6 m βάθος 30 m βάθος 40 m βάθος 25 m βάθος Περιορισμένο 50 m βάθος Απεριόριστο
Πασσαλοσανίδες	Οποιοδήποτε	Έως 15 m	Αποστράγγιση	Βάθος εξαρτώμενο από τον υποβιβασμό του υδροφόρου ορίζοντα και το βάθος του πασσάλου
Τεμνόμενοι πάσσαλοι	Οποιοδήποτε	Έως 20 m	Μπορεί να απαιτείται για ευστάθεια του πυθμένα	Απαιτεί μεγάλη επιφάνεια εργασίας
Επενδυμένη τάφρος	-	-	-	Δεν προτείνεται
Προκατασκευασμένα κιβώτια	2-3 m διάμετρος	Έως 10 m	Μπορεί να απαιτείται για ευστάθεια του πυθμένα	Κατάλληλο για μικροσήραγγες
Επιτόπου έγχυτα κιβώτια	Οποιοδήποτε	Έως 40 m	Μπορεί να απαιτείται για ευστάθεια του πυθμένα	Γενικά για μεγάλα έργα
Εκσκαφή με αντηρίδες	-	-	-	Δεν προτείνεται
Αγκυρώσεις γεωμάζας	-	-	-	Δεν προτείνεται

ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ

α) Τα φρέατα εργασίας μπορούν να μετατραπούν σε μόνιμα.

(β) Ο τύπος κατασκευής γενικά δεν διέπεται από τη μέθοδο βελτίωσης του εδάφους, η οποία βελτίωση πρέπει να θεωρείται ως μια βοήθεια για την κατασκευή μέθοδο.

(γ) Σε μη συνεκτικές υγρές συνθήκες φρέατα επενδυμένα με προκατασκευασμένα τόξα μπορούν επίσης να κατασκευαστούν με υποθεμελίωση κάνοντας χρήση μιας ασπίδας φρέατος.

(δ) Σε πετρώματα, ο σχεδιασμός του φρέατος εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του υλικού.

9.2.2.4 Επίγεια εγκατάσταση

Κατά την ανέλκυση το υλικό της εξόρυξης οδηγείται στο φρέαρ εισόδου και από εκεί στην επιφάνεια του φρέατος. Στις μεθόδους προώθησης σωλήνων, εφόσον τα μπάζα φθάνουν στον πυθμένα του φρέατος με βαγονέτα, αυτά είτε ανελκύονται με ανυψωτική μηχανή είτε μεταφορτώνουν το υλικό στη βάση του φρέατος σε γερανό, ο οποίος το αποθέτει στην επιφάνεια σε βαγόνια ή ειδικά διαμορφωμένο χώρο. Οι γερανοί μπορεί να είναι κινητοί ή στις πιο πολλές των περιπτώσεων χρησιμοποιούνται γερανογέφυρες (Σχήμα 9-3). Όπου χρησιμοποιείται πολφός (slurry) για τη μεταφορά και αποκομιδή του υλικού, οι σωληνώσεις εκτείνονται έως την επιφάνεια απ' όπου αντλείται το ρευστό και οδηγείται σε κύκλωμα διαχωρισμού.

Ο τύπος και ο βαθμός του διαχωρισμού που πρέπει να γίνει σε κάθε περίπτωση, αποτελεί κάτι πολύ σημαντικό για τη λειτουργικότητα του συστήματος με άμεση επίπτωση στο κόστος λειτουργίας. Το όλο σύστημα αποτελεί μικρών διαστάσεων ολοκληρωμένο κλειστό κύκλωμα επεξεργασίας. Ο σκοπός αυτής της διαδικασίας είναι ο διαχωρισμός της στερεής φάσης από τη ρευστή και η ανάκτηση του φέροντος ρευστού, ώστε να επαναδιοχετευθεί στο κύκλωμα. Οι συνήθεις μέθοδοι διαχωρισμού που ακολουθούνται είναι τα δοχεία - δεξαμενές καθίζησης, τα κόσκινα για το χονδρόκοκκο υλικό, οι υδροκυκλώνες και φυγοκεντρικοί διαχωριστές και τα δονούμενα κόσκινα και διηθητήρες κατακράτησης νερού. Αυτές οι μέθοδοι μπορούν να εφαρμοστούν είτε ξεχωριστά η κάθε μία είτε σε συνδυασμό.

Τα δοχεία - δεξαμενές αποτελούν από μόνα τους ολοκληρωμένο σύστημα στην περίπτωση που το φέρον ρευστό είναι το νερό. Είναι ιδιαίτερα φθηνή λύση και αποτελούνται από μία ή παραπάνω δεξαμενές σε σειρά, όπου το ρευστό, όπως εξέρχεται από τη σωλήνωση, αποτίθεται και καθιζάνει είτε με τη βαρύτητα είτε με χρήση ειδικών προσθέτων καταβύθισης. Όταν το μεταφερόμενο υλικό είναι κοκκώδες έδαφος (άμμος, χαλίκια) και με μέγεθος πάνω από 1 mm, ο χρόνος καθίζησης είναι μικρός και κατά συνέπεια το μέγεθος της δεξαμενής μπορεί να είναι σχετικά μικρό. Όταν όμως το μεταφερόμενο έδαφος είναι συνεκτικό ιλυώδες ή αργιλικό, τότε ο χρόνος καταβύθισης αυξάνεται κατά πολύ και μπορεί να φθάσει ακόμη και εβδομάδες. Σ' αυτές τις περιπτώσεις οι λύσεις που υπάρχουν είναι η χρήση δοχείων σε σειρά ή καταβυθιστικά αντιδραστήρια. Τα δοχεία σε σειρά πρέπει να έχουν στάθμη το ένα χαμηλότερη από το άλλο ώστε να επιτρέπεται η ομαλή ροή του ρευστού από τη μία στην άλλη. Τα καταβυθιστικά αντιδραστήρια επιδιώκουν τη συσσωμάτωση των λεπτομερών τεμαχίων και είναι αποτελεσματικά όταν η πυκνότητα του πολφού δεν είναι ιδιαιτέρως μεγάλη. Συνήθως πρόκειται για συνθετικά, οργανικά πολυμερή, με βάση το νερό, που προστίθενται σε αναλογία 0.1 % κατ' όγκο. Ωστόσο, οι Stein et. al. (1989) αναφέρουν ότι υπήρξαν περιπτώσεις όπου το μεταφερόμενο υλικό ήταν συνεκτικό σε λασπώδη συσσωματωμένη κατάσταση επιτρέποντας τη σχετικά γρήγορη καθίζηση με τη βαρύτητα.

Κόσκινα χρησιμοποιούνται στο πρώτο στάδιο της επεξεργασίας για την απομάκρυνση του υλικού με μέγεθος τεμαχίων πάνω από 3 mm ή σβώλων από συνεκτικά υλικά πάνω από 5 mm. Υδροκυκλώνες ενός σταδίου επιτρέπουν το διαχωρισμό τεμαχίων μέχρι 100 μικρά και αυτοί των δύο σταδίων μέχρι 35 μικρά. Το λεπτομερές υλικό λαμβάνεται από πάνω από την υπερχείλιση και το χονδρομερές από την απορροή. Οι φυγοκεντρικοί διαχωριστές μπορούν να διαχωρίσουν υλικό κάτω από 5 μm. Τα δονούμενα κόσκινα κατακράτησης νερού, όπως και οι διηθητήρες επιτυγχάνουν μείωση στην περιεκτικότητα του νερού κατά 20 - 25%.

Στην επιφάνεια βρίσκεται επίσης ο εξοπλισμός παροχής ισχύος. Η ενέργεια παρέχεται από Μ.Ε.Κ. Diesel ή από ηλεκτροκινητήρα με σταθερή ή κινητή βάση. Πέρα από την κύρια πηγή ενέργειας υπάρχουν και μονάδες αεροσυμπιεστών και ηλεκτρικές γεννήτριες για τις ανάγκες σε πιεσμένο αέρα, κίνησης μηχανισμών, αντλιών κλπ.

9.2.3 Οικονομική σύγκριση με την ανοικτή εκσκαφή

9.2.3.1 Κόστος υπόγειας διάνοιξης

Η άποψη που επικρατεί είναι ότι οι μέθοδοι υπόγειας εκσκαφής έχουν σημαντικά μεγαλύτερο κόστος από τις συμβατικές μεθόδους ανοικτής εκσκαφής. Αυτό είναι αληθές μέχρι κάποιο σημείο αλλά οι σύγχρονες εξελίξεις και οι περιβαλλοντικές απαιτήσεις μπορούν να αποτελέσουν το έναυσμα για την εφαρμογή τους σε πολλές περιπτώσεις. Ο λόγος για τον οποίο οι μέθοδοι αυτές δείχνουν να είναι πολύ πιο ακριβές είναι ότι το άμεσο κόστος αυτών είναι μεγαλύτερο από αυτό των συμβατικών μεθόδων. Στον υπολογισμό του κόστους των συμβατικών μεθόδων συνήθως δεν υπολογίζεται το έμμεσο και κοινωνικό κόστος το οποίο δεν επιβαρύνει τον κατασκευαστή, δημιουργώντας συνθήκες εξωτερικών οικονομιών. Για να γίνει λοιπόν αντικειμενική σύγκριση

μεταξύ των συμβατικών μεθόδων με τις μεθόδους διάνοιξης μικροσηράγγων, πρέπει να ληφθούν υπόψη τόσο το άμεσο όσο και το έμμεσο κόστος. Το άμεσο κόστος περιλαμβάνει όλα τα έξοδα που απαιτούνται για τη διάνοιξη, εγκατάσταση και κατασκευή του αγωγού, την απόσβεση του εξοπλισμού, το κόστος παρακάμψεων και τις πληρωμές προς κατασκευαστές και προμηθευτές.

Σε ότι αφορά τις μεθόδους μη ανοικτής εκσκαφής, το άμεσο κόστος μπορεί να θεωρηθεί ότι αφορά την κατασκευή φρεάτων, την αγορά σωλήνων και τις εργασίες διάνοιξης - τοποθέτησης σωλήνωσης.

α) Κατασκευή φρεάτων. Τα φρέατα αποτελούν ένα πολύ σημαντικό τμήμα του άμεσου κόστους που κυμαίνεται από 25% έως 35%, χωρίς να ληφθεί υπόψη ένα ποσοστό του κόστους που προστίθεται σ' αυτά στην περίπτωση συνάντησης απρόσμενων εδαφικών συνθηκών (Moss, 1989; Stein et. al., 1989). Το συνολικό κόστος κατασκευής μειώνεται όσο μικραίνει το βάθος εκσκαφής τους και όσο μειώνεται ο αριθμός τους. Αύξηση της διαμέτρου πάνω από τα 3.0 m οδηγεί σε δραματική αύξηση του κόστους, ακόμη και όταν οι εδαφικές συνθήκες είναι σχετικά καλές. Εξίσου ανάλογη είναι η επιβάρυνση από την αύξηση του βάθους (Thomson, 1993).

β) Σωλήνες. Όπως έχει αναφερθεί, οι σωλήνες που χρησιμοποιούνται είναι ειδικής κατασκευής και προδιαγραφών με αποτέλεσμα την υψηλότερη τιμή αγοράς σε σχέση με τους σωλήνες που χρησιμοποιούνται στις συμβατικές μεθόδους ανοικτής εκσκαφής. Η συμμετοχή τους στο άμεσο κόστος ανάλογα με την περίσταση κυμαίνεται σε ευρέα όρια από 15 έως 40% (Thomson, 1993). Η μεταβλητότητα στο κόστος εξαρτάται άμεσα από το σχεδιασμό που έχει προηγηθεί. Μία παράμετρος είναι το υλικό κατασκευής και η ποιότητα της επένδυσης. Η σχέση κόστους μεταξύ των απλών τσιμεντοσωλήνων προς τους χαλυβοσωλήνες είναι 1 προς 2, αλλά οι τιμές μεταβάλλονται σημαντικά και για τους δύο όταν πρόκειται να υποστούν αντιδιαβρωτική προστασία. Άλλη παράμετρος είναι η διάμετρος και το μήκος. Η αύξηση της διαμέτρου συνοδεύεται από αύξηση του κόστους, όπως επίσης και από αύξηση του πάχους των τοιχωμάτων. Για την αυτή εσωτερική διάμετρο η αύξηση του πάχους των τοιχωμάτων επιφέρει αύξηση της τιμής. Τα μεγάλα μήκη μειώνουν το κόστος ανά μέτρο μήκους εφόσον μειώνουν τον αριθμό των απαιτούμενων συνδέσεων ανά μέτρο μήκους. Το κόστος για σωλήνες διαμέτρου 500-600 mm μπορεί να κυμανθεί από 50 έως 200 λίρες ανά m για συστήματα με ασπίδα. Για συστήματα προώθησης σωλήνων το κόστος για σωλήνες διαμέτρου 900 έως 1800 mm είναι από 130 έως 350 λίρες ανά m (Thomson, 1993).

γ) Εργασίες διάνοιξης. Αυτές εμπεριέχουν την αγορά του εξοπλισμού, τη λειτουργία και την εγκατάσταση.

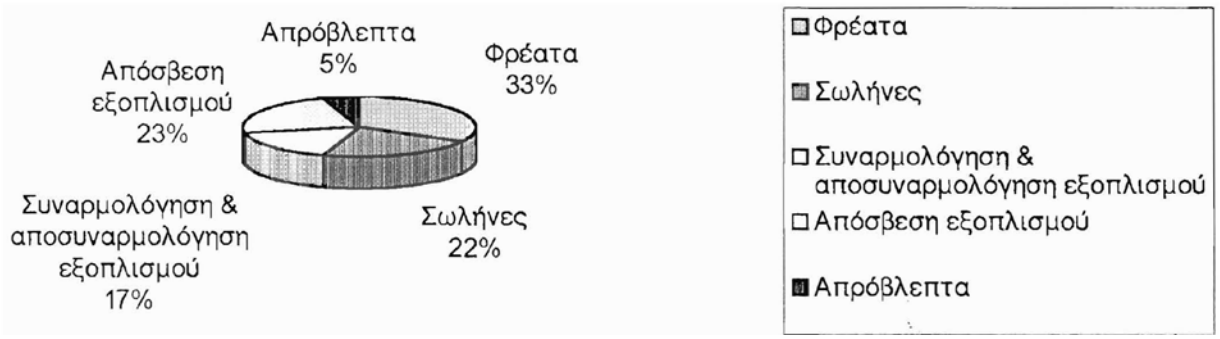
Το κόστος του συστήματος διάνοιξης αφορά την αγορά του μηχανήματος μαζί με όλο τον εξοπλισμό του είτε καινούργιο είτε μεταχειρισμένο. Στην τελευταία περίπτωση απαιτείται μόνο η αγορά καινούργιας κοπτικής κεφαλής ή κοπτικών άκρων, ενώ η μείωση του κόστους φθάνει το 50%. Σ' αυτό το κόστος περιλαμβάνεται και το κόστος απόσβεσης του αρχικού κεφαλαίου. Επειδή με αντικειμενικά κριτήρια η δαπάνη για την αγορά ενός τέτοιου συστήματος είναι μεγάλη, πρέπει να επιδιώκεται υψηλός συντελεστής χρησιμοποίησης, ο οποίος σύμφωνα με τον Elvidge (1987) πρέπει να υπερβαίνει τα 500 m ανά έτος. Ο μέσος χρόνος απόσβεσης εκτιμάται ότι είναι 5 χρόνια, θεωρώντας ότι σε αυτό το διάστημα το συνολικό μήκος αγωγών φθάνει τα 10 km ή τις 10000 ώρες εργασίας (Thomson, 1993). Το κόστος συντήρησης δεν είναι σταθερό και εξαρτάται από τις εκάστοτε συνθήκες. Ορισμένοι κατασκευαστές το υπολογίζουν ως κάποιο ποσοστό του κόστους κεφαλαίου, π.χ. 50% σε 10 km διάνοιξης. Έτσι, για ένα σύστημα αξίας 400,000 λιρών το κόστος συντήρησης είναι 20 λίρες ανά m (Thomson, 1993). Τρέχοντα έξοδα του εξοπλισμού υπολογίζονται συνήθως εμπειρικά και κυμαίνονται στην αυτή τάξη μεγέθους.

Το λειτουργικό κόστος αφορά τον εξοπλισμό και το εργατικό προσωπικό. Το λειτουργικό κόστος του εξοπλισμού εκφράζεται σε μονάδες κόστους ανά μέτρο προχώρησης ή ανά ώρα λειτουργίας. Η μείωση του λειτουργικού κόστους επέρχεται με την αύξηση του ρυθμού προχώρησης. Γενικά, οι μέθοδοι δύο σταδίων υστερούν σ' αυτό το σημείο γιατί ο μέσος ρυθμός προχώρησης είναι χαμηλός, σε αντίθεση με τις μη καθοδηγούμενες δυναμικές μεθόδους μετατόπισης, όπου σε ορισμένες συνθήκες οι ρυθμοί είναι εντυπωσιακοί. Το μέρος του λειτουργικού κόστους που αφορά το προσωπικό εξαρτάται από τον αριθμό των εργαζομένων, από τη μέθοδο που πρόκειται να εφαρμοστεί, από το μέγεθος του έργου, από τη χώρα εφαρμογής και από το επίπεδο ημερομισθίων. Συνήθως, οι λιγότερο εκμηχανισμένες μέθοδοι με προώθηση σωλήνων απαιτούν μεγαλύτερο πλήρωμα από ότι οι άλλες μέθοδοι. Ο μεγαλύτερος αριθμός εργατών επιβαρύνει το κόστος προσφέροντας πολύ λίγο στην αύξηση της παραγωγικότητας. Αντίθετα, η παραγωγικότητα αυξάνεται όταν το προσωπικό είναι καλά εκπαιδευμένο και έμπειρο. Η επίδραση αυτού του κόστους στο συνολικό είναι μικρή στις εκμηχανισμένες και αυτοματοποιημένες μεθόδους και μεγαλύτερη σε μικρά έργα και στις μερικώς εκμηχανισμένες μεθόδους.

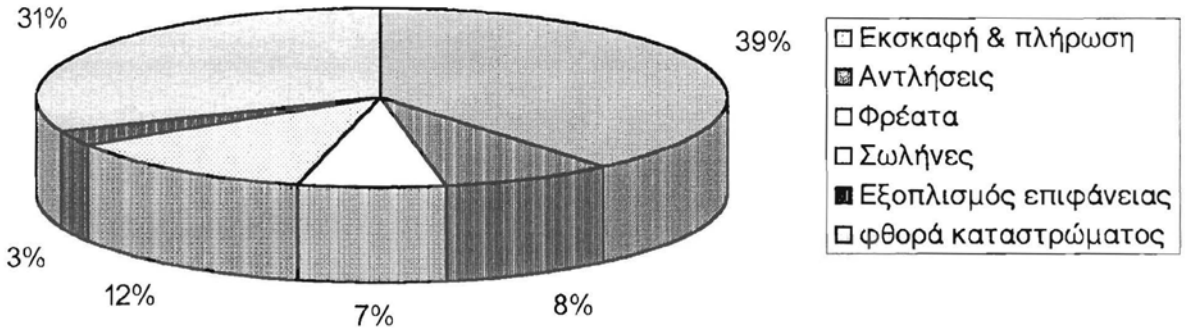
Το κόστος εγκατάστασης μπορεί να είναι εξόχως σημαντικό ιδίως στις μεθόδους με ασπίδα, όπου εκτός του πολύπλοκου εξοπλισμού της μηχανής που θα πρέπει να στηθεί επί τόπου, υπάρχει και το σύστημα

επεξεργασίας και διαχωρισμού στην επιφάνεια. Είναι φανερό ότι, επειδή αυτό το κόστος είναι σταθερό, πρέπει τέτοιος ακριβός εξοπλισμός να προορίζεται για έργα μεγάλου μήκους και αφού εξαντληθούν οι άλλες δυνατότητες. Η σωστή οργάνωση και ο προγραμματισμός των εργασιών βοηθούν σημαντικά στο να κερδηθούν νεκροί χρόνοι που απαιτούνται για ρυθμίσεις αλλαγής διεύθυνσης πορείας (turnaround) και μετακίνησης από το ένα φρέαρ στο άλλο. Οι νεκροί αυτοί χρόνοι μπορούν να φθάσουν το 40% του συνολικού χρόνου.

Συμπερασματικά, για τις μεθόδους μη ανοικτής εκσκαφής το άμεσο κόστος αποτελεί το μεγαλύτερο τμήμα του συνολικού κόστους σε ποσοστό πάνω από το 80%. Σε ότι αφορά τις μεθόδους, η πιο ακριβή ανά μέτρο μήκους είναι αυτή με προπορεία, ενώ από πλευράς αρχικής επένδυσης οι ασπίδες με πολφό (slurry) σταθεροποίησης έχουν μεγαλύτερο κόστος από αυτές με κοχλία (auger). Η μέθοδος της προώθησης σωλήνων αποτελεί πολύ συχνά τη φθηνότερη λύση (Thomson, 1993). Στο Σχήμα 9-12α δίνεται μία κατανομή του κόστους αυτής της μεθόδου.



(α) Καταμερισμός άμεσου κόστους προώθησης σωλήνων



(β) Καταμερισμός άμεσου κόστους ανοικτής εκσκαφής (Mohring, 1992)
Σχήμα 9-12. Καταμερισμός κόστους

9.2.3.2 Κόστος ανοικτής εκσκαφής

9.2.3.2.1 Άμεσο κόστος ανοικτής εκσκαφής

Σε αντίθεση με τις μεθόδους που εξετάστηκαν προηγουμένως, στις συμβατικές μεθόδους το άμεσο κόστος είναι το μικρότερο μέρος του συνολικού κόστους, παρ' όλο που μέρος του έμμεσου κόστους δεν λαμβάνεται υπόψη. Ο Mohring (1992) αναφέρει (1992) ότι σχεδόν το 70% του κόστους κατασκευής δεν αφορά καθαυτή την κατασκευή αλλά προκαταρκτικές και επισκευαστικές εργασίες. Το άμεσο κόστος περιλαμβάνει όλα τα έξοδα κατασκευής και πληρωμών καθώς και κόστη απρόβλεπτων παραγόντων, όπως αντλήσεις, καθυστερήσεις λόγω τοπογραφικών και καιρικών συνθηκών και δύσκολες εδαφικές συνθήκες. Στο Σχήμα 9-12β ο Mohring (1992) δίνει αντιπροσωπευτική εκτίμηση της κατανομής του άμεσου κόστους.

9.2.3.2.2 Έμμεσο κόστος

Το έμμεσο κόστος αποτελεί και το πιο δύσκολο μέρος του κόστους το οποίο μπορεί να προσδιορισθεί, χωρίς αυτό να είναι πάντοτε δυνατό, τουλάχιστο ποσοτικά. Το έμμεσο κόστος μπορεί να διακριθεί σε περιβαλλοντικό

και κοινωνικό κόστος χωρίς να είναι σαφή τα όρια τους. Σε πολλές πόλεις στο εξωτερικό έχουν παρθεί ορισμένα μέτρα που ακριβώς αντανακλούν το ενδιαφέρον των αρχών για το κοινωνικό κόστος των κατασκευαστικών εργασιών. Έτσι, για παράδειγμα, στο Τόκιο για εγκατάσταση και συντήρηση δικτύου απαιτείται ειδική άδεια από τις αρχές του δρόμου. Στο κέντρο της πόλης εργασίες τέτοιου είδους επιτρέπονται μόνο μετά τα μεσάνυκτα έως τις 6.00 το πρωί, ενώ κατά τη διάρκεια της ημέρας όλες οι εκσκαφές πρέπει να σκεπάζονται έτσι ώστε να διευκολύνεται η κυκλοφορία. Ανάλογα μέτρα ισχύουν και στο Χονγκ - Κονγκ, ενώ στη Νέα - Υόρκη ισχύει περιορισμός κατά τις ώρες εργασίας. Στην Αγγλία υπάρχει νόμος για χρέωση από τις τοπικές αρχές του τμήματος του δρόμου που καταλαμβάνεται και σε άλλες πόλεις στην Ευρώπη συζητείται σοβαρά το ενδεχόμενο ενοικίασης του δρόμου ώστε ο κατασκευαστής να επισπεύδει την κατασκευή.

α) Περιβαλλοντικό κόστος. Το περιβαλλοντικό κόστος προκύπτει από την ανάγκη να ποσοτικοποιηθεί η επίπτωση που μπορεί να έχει στο περιβάλλον ένα έργο όπως η τοποθέτηση ενός αγωγού. Το περιβαλλοντικό κόστος επιμερίζεται στην όχληση λόγω θορύβων, δονήσεων και αέριας ρύπανσης και στον καταβιβασμό της στάθμης του υπογείου ύδατος λόγω αντλήσεων. Οι θόρυβοι, οι δονήσεις και τα αέρια ρύπανσης (εκπομπές καυσαερίων Μ.Ε.Κ., σκόνη) προέρχονται κυρίως από τις μεθόδους ανοικτής εκσκαφής κατά τη διάρκεια λειτουργίας μηχανημάτων, όπως είναι μηχανικά πτύα, αερόσφυρες, αεροσυμπιεστές, φορτηγά αυτοκίνητα κ.α. Οι επιπτώσεις από τις αντλήσεις μπορεί να είναι άμεσα αντιληπτές ή μετά από κάποιο χρονικό διάστημα. Πρόβλημα μπορεί να εμφανισθεί στις φυτεύσεις σε πεζοδρόμια, πάρκα ή κήπους που βρίσκονται κοντά στον άξονα του προς τοποθέτηση αγωγού. Εξάλλου, εξαντλητικές αντλήσεις σε ορισμένες περιπτώσεις οδηγούν σε αστοχία του πυθμένα της εκσκαφής και θέτουν σε κίνδυνο τις παρακείμενες στο έργο θεμελιώσεις κτιρίων.

β) Κοινωνικό κόστος. Διακρίνεται σε αποζημιώσεις, σε μείωση της ποιότητας και σε κυκλοφοριακό κόστος.

Οι χρηματικές αποζημιώσεις αφορούν την καταστροφή ιδιωτικών περιουσιών όπως είναι κτίρια, πεζοδρόμια, κήποι και υπάρχοντα δίκτυα. Επίσης, μία άλλη μορφή αποζημιώσεων είναι αυτή που καλύπτει την απώλεια εισοδήματος σε επιχειρήσεις που θίγονται από τις εργασίες κατασκευής. Οι αποζημιώσεις υπολογίζονται βάσει συγκεκριμένων δικαστικών αποφάσεων, κανονιστικών ρυθμίσεων ή με απευθείας συνεννόηση με τον ενδιαφερόμενο.

Ο κατασκευαστής του έργου έχει υποχρέωση να προβεί σε αποκατάσταση όσων ζημιών και καταστροφών προξένησε. Στην περίπτωση πεζοδρομίων και καταστρωμάτων δρόμων, Stein et. al., (1989) , Thomson (1993), ακόμη και όταν η αποκατάσταση είναι μεγάλης έκτασης επέρχεται μείωση της ωφέλιμης διάρκειας ζωής.

Το κυκλοφοριακό κόστος αφορά ουσιαστικά το κόστος λόγω των παρακάμψεων της κυκλοφορίας από τις εκσκαφές για την τοποθέτηση δικτύων. Ουσιαστικά, πρόκειται για το κόστος των χαμένων εργατοωρών λόγω του περιορισμού της κυκλοφορίας. Ποσοτικές εκτιμήσεις από τη μείωση της ταχύτητας των οχημάτων ή του διαθέσιμου χώρου διάβασης δίνουν οι Stein et. al. (1989) και ο Thomson (1993). Εκεί αναφέρεται ότι το κόστος παράκαμψης μπορεί να φθάσει 1.25 φορές το άμεσο κόστος κατασκευής. Επίσης, αναφέρεται (Moss, 1989) ότι με βάση στοιχεία από 10 διαφορετικά μέρη ο λόγος μεταξύ κυκλοφοριακού κόστους προς το άμεσο κόστος κυμαίνεται μεταξύ 0.5 και 5.

9.2.3.3 Σύγκριση μεταξύ ανοικτών & υπογείων μεθόδων

Αν η σύγκριση περιορισθεί σε αυστηρά πλαίσια του άμεσα προσδιορίσιμου κόστους, η παραδοσιακή ανοικτή εκσκαφή είναι οικονομικότερη. Εφόσον όμως είναι υποψήφια μία υπόγεια μέθοδος για τη διάνοιξη κάποιου έργου, απαιτείται τουλάχιστο σε επίπεδο μελέτης σκοπιμότητας η σύγκριση των δύο μεθόδων. Ωστόσο υπάρχουν περιπτώσεις όπου οι μέθοδοι υπόγειας εκσκαφής αποδείχθηκαν άμεσα οικονομικότερες, όπως αναφέρεται από την USNTT (1989) και από τους Henry & Zoumaras (1994).

Θα πρέπει να γίνει αντιληπτό ότι οι μέθοδοι υπόγειας εκσκαφής δεν έχουν στόχο την πλήρη υποκατάσταση των παραδοσιακών μεθόδων, τουλάχιστο στο άμεσο μέλλον, αλλά την αύξηση του μεριδίου της αγοράς σε εφαρμογές όπου έχει αποδειχθεί η αποτελεσματικότητά τους και η οικονομικότητά τους. Τα κύρια κριτήρια φαίνονται να είναι το μέγεθος του έργου, το βάθος τοποθέτησης του αγωγού, οι εδαφικές συνθήκες και το περιβάλλον.

Το μέγεθος του έργου είναι μεγάλης σημασίας γιατί το κόστος απόσβεσης του εξοπλισμού είναι υψηλό και δε συμφέρει η χρήση του σε μικρά έργα. Το μέγεθος αναφέρεται κυρίως στο μήκος των αγωγών, στο μέγεθος της διαμέτρου και στη σπουδαιότητά του.

Το βάθος τοποθέτησης είναι από τους κυριότερους παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή ή όχι της μεθόδου. Γενικά, υπάρχει η πεποίθηση ότι το μεγάλο βάθος (> 4.0 m) ευνοεί τις μεθόδους υπόγειας εκσκαφής

παρ' όλο που ο Mohring αναφέρει ότι εφαρμόζονται στο Βερολίνο όπου η πλειονότητα των αγωγών βρίσκεται σε βάθος 2.5 m.

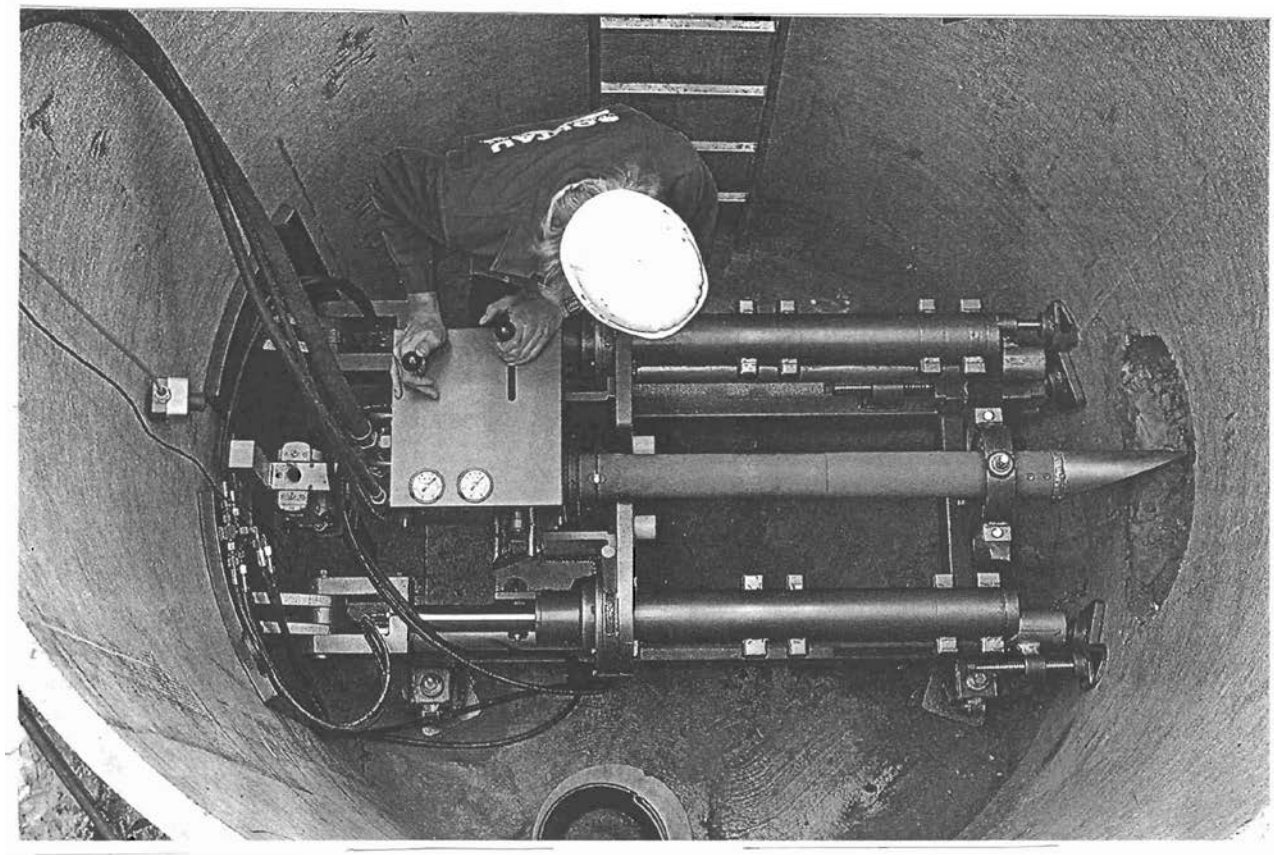
Οι εδαφικές συνθήκες και ιδιαίτερα ο υδροφόρος ορίζοντας οδηγούν πολλές φορές στην επιλογή της υιοθέτησης μεθόδων υπόγειας διάνοιξης, ιδιαίτερα όταν αναμένονται υψηλές παροχές υπογείων νερών. Δύσκολες εδαφικές συνθήκες, όπως ρέοντα εδάφη, μπορούν να αντιμετωπισθούν με αυτές τις μεθόδους χωρίς προηγούμενη επεξεργασία, όπως για παράδειγμα ενέσεις βελτίωσης που απαιτούνται στις μεθόδους ανοικτής εκσκαφής.

Η προστασία του περιβάλλοντος χώρου μπορεί να επιβάλλει χαμηλό βαθμό επέμβασης που μόνο οι υπόγειες μέθοδοι μπορούν να επιτύχουν. Αυτοί οι χώροι μπορεί να είναι ιστορικοί, αρχαιολογικοί, ιδιαίτερης φυσικής ομορφιάς, ποτάμια, λίμνες, ευαίσθητα κτίσματα, βιομηχανικές εγκαταστάσεις, κ.α. Επίσης, επειδή κατά τεκμήριο οι μέθοδοι αυτές προκαλούν τις μικρότερες μετακινήσεις στην επιφάνεια του εδάφους, προτιμώνται για διανοίξεις κάτω από αυτοκινητόδρομους και σιδηροδρομικές γραμμές.

9.2.4 Κατασκευή συνδετήριων σωληνώσεων

Ο ρόλος των συνδετήριων σωληνώσεων είναι η σύνδεση των κύριων αγωγών των δικτύων με τα κτίρια και τις κατασκευές. Η κατασκευή αυτών των σωληνώσεων γίνεται είτε με ανοικτή εκσκαφή είτε με κάποιες τεχνικές υπόγειας εκσκαφής, μερικώς ή πλήρως εκμηχανισμένων. Εξέχουσας σημασίας είναι οι καλής ποιότητας συνδέσεις μεταξύ της σωλήνωσης και συνδετήριας κατασκευής η οποία μπορεί να είναι φρεάτιο ή υπάρχων αγωγός. Ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες η εγκατάσταση των δευτερευουσών σωληνώσεων μπορεί να γίνει από το κτίριο προς τον κύριο αγωγό ή φρέαρ ή προς την αντίθετη κατεύθυνση.

Υπάρχουν δύο κατηγορίες τεχνικών υπόγειας διάνοιξης δευτερευουσών σωληνώσεων. Η πρώτη αφορά συστήματα χωρίς δυνατότητα καθοδήγησης. Σ' αυτά τα συστήματα η όρυξη πραγματοποιείται σε ένα ή δύο στάδια από φρεάτιο προς τον κύριο αγωγό, ενώ πολλές φορές απαιτείται ανθρώπινη παρουσία στον κύριο αγωγό για το τελείωμα των εργασιών. Στην Ιαπωνία πολλές φορές εφαρμόζεται μία τεχνική κατά την οποία η σύνδεση του κύριου αγωγού (> 600 mm) με το φρεάτιο γίνεται με τη βοήθεια διατρητικής ράβδου πυρήνα (core boring rod) πίσω από την οποία ακολουθεί σωλήνωση από PVC (Stein et al, 1989). Η δεύτερη αφορά καθοδηγούμενες τεχνικές οι οποίες πραγματοποιούνται σε δύο στάδια για αγωγούς εσωτερικής διαμέτρου 100 - 200 mm. Τέτοια συστήματα παράγουν πολλές εταιρίες (Σχήμα 9-13), ενώ η Lafrentz Bau GmbH & Co παρουσίασε ένα σύστημα με πιεσμένο αέρα για υδροφόρα εδάφη (Rokahr, 1995).



Σχήμα 9-13. Διάνοιξη συνδετήριας σωλήνωσης με σφύρα μετατόπισης, για εν συνεχεία διεύρυνση με μηχανή εκσκαφής και τοποθέτηση σωλήνωσης (Soltau GmbH)

Σημειώνεται ότι με τη χρήση των υπόγειων μεθόδων διάνοιξης αναπτύχθηκαν δύο τρόποι σύνδεσης των αγωγών. Στην πρώτη περίπτωση, όπου μπορεί να γίνει άμεση σύνδεση της δευτερεύουσας σωλήνωσης με τον κύριο αγωγό, μπορούν να χρησιμοποιηθούν όλες οι τεχνικές που προαναφέρθηκαν. Μετά τη θραύση του τοιχώματος του κύριου αγωγού γίνεται απευθείας σύνδεση λαμβάνοντας φροντίδα για τη στεγανότητα της σύνδεσης, την υψηλή μηχανική αντοχή και την ανθεκτικότητα σε διάβρωση. Ένα πρόβλημα που παρουσιάζεται στην πράξη είναι η μεγάλη υψομετρική διαφορά μεταξύ δευτερευόντων και κύριων αγωγών που οδηγεί σε μεγάλες κλίσεις με αποτέλεσμα τη δυσκολία εφαρμογής και ελέγχου των καθοδηγούμενων τεχνικών. Η λύση που ακολουθείται είναι η σύνδεσή τους με προκατασκευασμένα τμήματα σωλήνων και γωνιών. Πρόβλημα επίσης παρουσιάζεται όταν η διάμετρος του κύριου αγωγού είναι μικρότερη από 500 mm, γιατί όσο μικρότερη είναι η διάμετρος τόσο δυσκολότερα γίνεται η κατασκευή της σύνδεσης.

Στη δεύτερη περίπτωση η σύνδεση γίνεται έμμεσα και επιτυγχάνεται μέσω κάποιου κεντρικού φρεατίου. Συγκεκριμένα, από ένα κεντρικό φρεάτιο το οποίο βρίσκεται πάνω στον άξονα του κύριου αγωγού, ξεκινούν οι δευτερεύουσες σωληνώσεις και καταλήγουν σε φρεάτια κτισμάτων. Από ένα φρεάτιο μπορεί να ξεκινούν ακτινικά δευτερεύοντες αγωγοί προς διάφορες διευθύνσεις δημιουργώντας σχήμα άστρου ή από ένα φρεάτιο να συνδέονται δευτερεύοντες αγωγοί μερικών οικιών και από εκεί να υπάρχει σύνδεση με το κύριο φρεάτιο του κύριου αγωγού. Η διάταξη αυτή είναι γνωστή ως "μέθοδος του Βερολίνου". Η μέθοδος αυτή έχει αποδειχθεί ότι σε αστικό περιβάλλον παρέχει κατασκευαστικές ευκολίες, γρήγορη ολοκλήρωση, εύκολο έλεγχο και συντήρηση και χαμηλότερο κόστος. Πρέπει όμως τα κεντρικά φρεάτια να κατασκευάζονται με προσοχή σύμφωνα με αυστηρές προδιαγραφές.

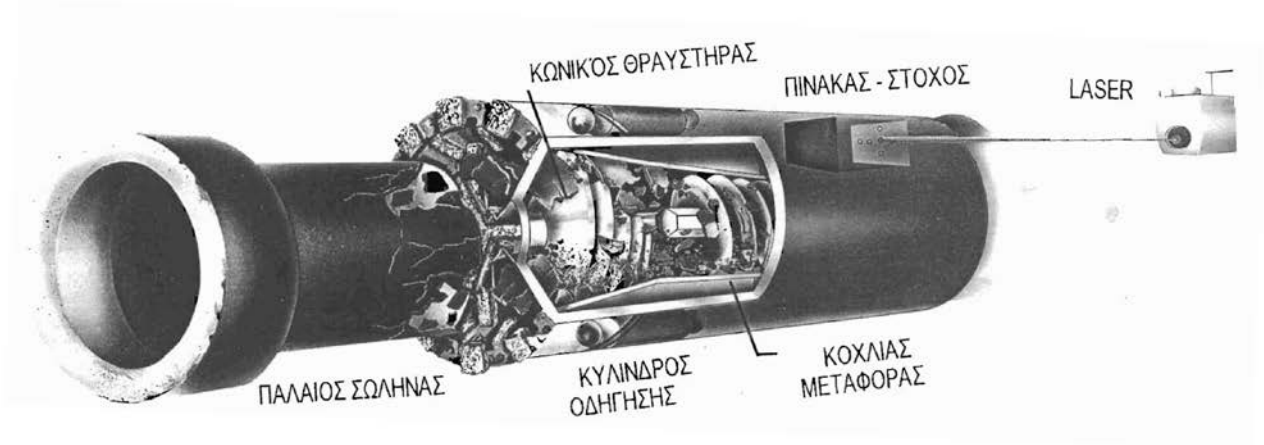
9.2.5 Αποκατάσταση αγωγών (Rehabilitation)

Για πολλές πόλεις της Ευρώπης και της Αμερικής αποτελεί επιτακτική ανάγκη η αποκατάσταση των ήδη υπαρχόντων δικτύων εξυπηρέτησης. Ο όρος αποκατάσταση περιλαμβάνει τρία επίπεδα επεμβάσεων, ανάλογα με την κατάσταση του αγωγού ήτοι : η τοπική επιδιόρθωση (local repair) του αγωγού, η ανανέωση (renovation) του αγωγού με κατάλληλη επανεπένδυση (relining) του (Τεπασκουάλος & Σοφιανός, 2003a) και η

ανακατασκευή (renewal) του με καινούργιο αγωγό. Επί του παρόντος θα μας απασχολήσει η τρίτη κατηγορία μεθόδων αποκατάστασης. Για το σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί ορισμένες τεχνικές που μπορούν να εφαρμοστούν με επιτυχία.

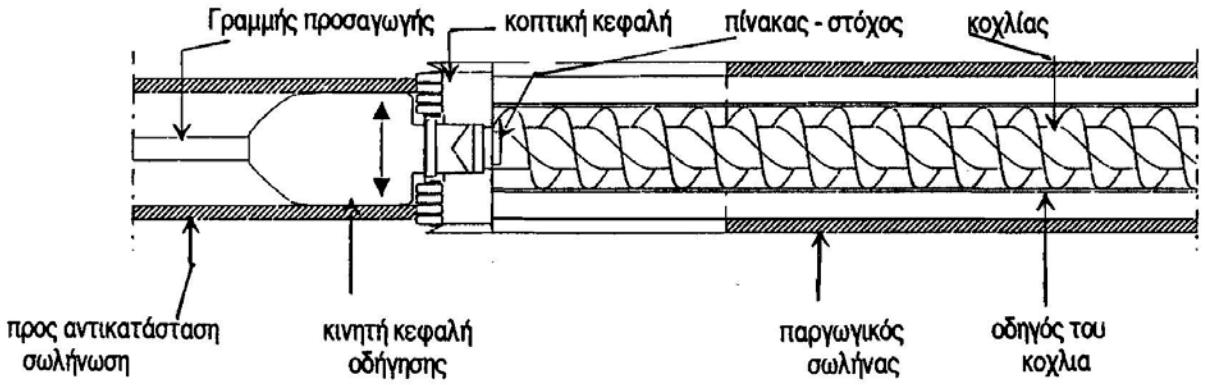
Κατά την ανακατασκευή αγωγών (Τεπασκουάλος & Σοφιανός, 2003b) η νέα σωλήνωση, που συνήθως είναι μεγαλύτερου μεγέθους και καλύτερης ποιότητας, τοποθετείται ακολουθώντας την παλαιά χάραξη, με την προϋπόθεση ότι αυτή μπορεί να εξυπηρετήσει το νέο αγωγό. Οι συνήθεις τεχνικές που χρησιμοποιούνται είναι της αντικατάστασης ή άλεσης (replacement / eating) και της διάρρηξης (bursting).

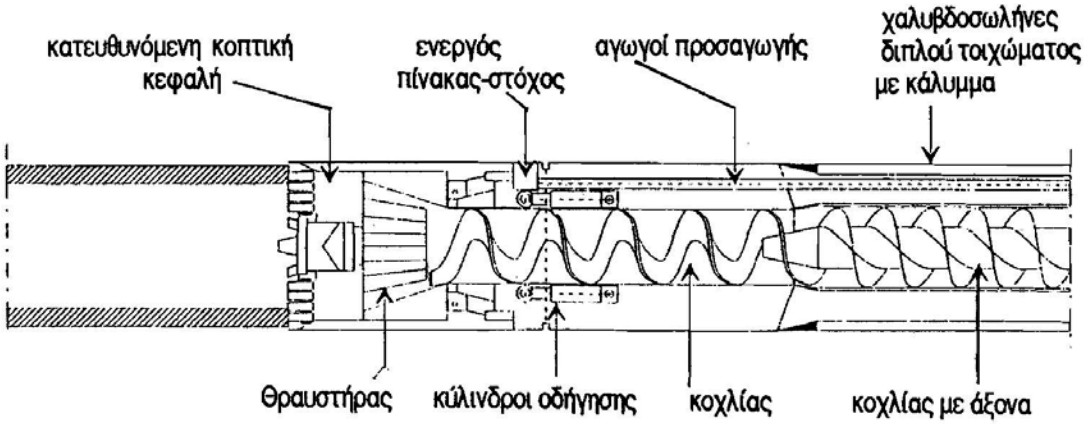
Η τεχνική της αντικατάστασης ή άλεσης (Σχήμα 9-14) συνίσταται στη θραύση του παλαιού αγωγού από μία κατάλληλα διαμορφωμένη κοπτική κεφαλή μίας μηχανής ολομέτωπης όρυξης και στην αντικατάστασή του από καινούργιο. Τελευταία έχει επικρατήσει ο όρος pipe eating (φάγωμα) για τα αντίστοιχα συστήματα με βάση το γεγονός ότι ο παλαιός σωλήνας "τρώγεται" από τη μηχανή και τα θραύσματα αποκομίζονται διαμέσου του συστήματος αποκομιδής της μηχανής. Η διαμορφωμένη κοπτική κεφαλή (Σχήμα 9-15) συνδυάζεται με μηχανές τύπου ασπίδας με υδραυλική ή μηχανική αποκομιδή (Holterhoff, 1995). Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί για αγωγούς εσωτερικής διαμέτρου 250 - 600 mm, για αποστάσεις έως 70 m, με ταχύτητα 8 - 13 m/8h (Stein et al, 1989 - Holterhoff, 1995).



Σχήμα 9-14. Τεχνική αντικατάστασης σωλήνων με φάγωμα (Soltau GmbH)

Η τεχνική της διάρρηξης (pipe bursting) συνίσταται στη διάρρηξη και θραύση με τη βοήθεια μιας κατάλληλης διάταξης. Το υλικό του προς αντικατάσταση σωλήνα πρέπει να είναι ψαθυρό, όπως χυτοσίδηρος, άοπλο σκυρόδεμα ή αργιλοπυρίτιο. Η καινούργια σωλήνωση τοποθετείται αμέσως ύστερα από τη φάση της διάρρηξης. Η διάρρηξη μπορεί να επιτευχθεί με δυναμικό (dynamic) ή στατικό (static) τρόπο. Η δυναμική διάρρηξη χρησιμοποιεί μια τροποποιημένη σφύρα μετατόπισης στην οποία έχει προσαρμοστεί μια κωνική αναπτυσσόμενη κεφαλή ή κάποια άλλη διάταξη που προκαλεί θραύση της σωλήνωσης. Το σύστημα ωθείται ή έλκεται από ένα καλώδιο που προσδένεται σε ειδική διάταξη στο φρέαρ άφιξης. Ο παλαιός σωλήνας θραύεται και τα κομμάτια του μετατοπίζονται στο έδαφος γύρω από τη διαρρηκτική κεφαλή. Μ' αυτήν την τεχνική μπορούν να αντικατασταθούν αγωγοί εσωτερικής διαμέτρου 75 - 400 mm, για μήκη μέχρι 120 m, με ταχύτητα 1 - 2.5 m/min (π.χ. Tracto - Technik GmbH). Τα στατικά συστήματα διάρρηξης χρησιμοποιούν έναν αναπτυσσόμενο μηχανισμό που βρίσκεται μέσα σε μία διαρρηκτική μονάδα. Μετά την τοποθέτηση της διάταξης στον παλαιό σωλήνα ενεργοποιείται υδραυλικά ο αναπτυσσόμενος μηχανισμός εκτείνοντας τα μέλη της διαρρηκτικής μονάδας που σπάζει τον αγωγό σε κομμάτια. Ο νέος σωλήνας έλκεται με καλώδιο από το φρέαρ εξόδου. Η στατική διάρρηξη είναι κατάλληλη για αγωγούς εσωτερικής διαμέτρου 200 - 400 mm και έχει το πλεονέκτημα της δημιουργίας εξαιρετικά μικρών διαταραχών στην επιφάνεια (Stein et al, 1989). Δεν εφαρμόζεται σε σωλήνες από χάλυβα, οπλισμένο σκυρόδεμα ή αμίαντο και απαιτούνται επιπλέον μέτρα όταν ο υδροφόρος ορίζοντας είναι ψηλά. Μεγάλη σημασία έχει ο έλεγχος των εδαφικών μετακινήσεων, ιδιαίτερα σε αμμώδη εδάφη για την αποφυγή φαινομένων ρευστοποίησης.

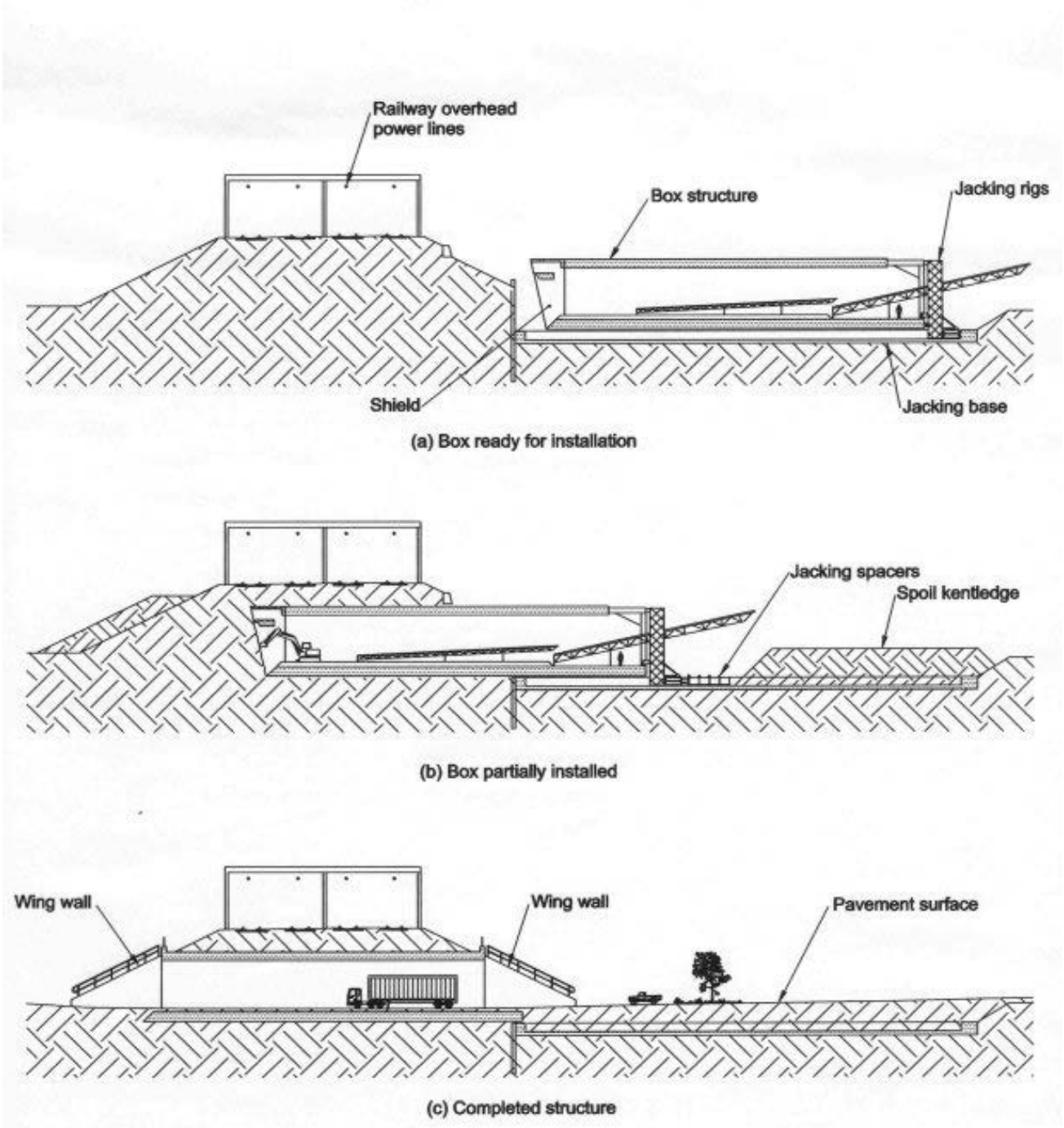




Σχήμα 9-15. Τυπικά συστήματα αντικατάστασης σωληνώσεων (Beyert, 1992)

9.3 Ώθηση κιβωτίων

Η διάνοιξη σήραγγας με ώθηση κιβωτίου περιλαμβάνει την ώση προκατασκευασμένου φορέα σήραγγας (κιβώτιο) προς το έδαφος, με σύγχρονη εκσκαφή του μετώπου μέσα από μια ασπίδα. Παρόλο ότι η τεχνική δεν είναι καινούργια και εφαρμόζεται πολλές δεκαετίες, οι πρόσφατες εξελίξεις τής επέτρεψαν την εγκατάσταση κιβωτίων μεγάλης διατομής κάτω από λειτουργούντες αυτοκινητόδρομους και σιδηροδρόμους. Το υπερκείμενο έδαφος σε αυτές τις σήραγγες μπορεί να είναι πολύ μικρό, π.χ. δύο μέτρα. Για παράδειγμα η υπόγεια διέλευση του αυτοκινητόδρομου M1, J15A στην Αγγλία, περιλάμβανε την ώθηση μονολιθικού κιβωτίου, μήκους 45 m, πλάτους 14 m και ύψους 8.5 m, από οπλισμένο σκυρόδεμα, κάτω από αυτοκινητόδρομο σε λειτουργία. Το βάθος κάλυψης του κιβωτίου ήταν 2.2 μέτρα κάτω από το κύριο οδόστρωμα.



Σχήμα 9-16. Διαδικασία εγκατάστασης κιβωτίου.

Οι χρήσεις των σηράγγων αυτών παραδοσιακά είναι για υπόγειες διαβάσεις πεζών και αυτοκινήτων. Όπως και σε όλες τις διανοίξεις σηράγγων, πρέπει να διεξάγεται διεξοδική έρευνα υπεδάφους για τον προσδιορισμό της αντοχής και της σταθερότητάς του. Παράλληλα πρέπει να καταγράφονται οι υπερκείμενες υποδομές εντός της ζώνης επιρροής της διάνοιξης και να εντοπίζονται τυχόν θέσεις όπου απαιτείται λήψη μέτρων προστασίας. Τα κυριότερα οφέλη της μεθόδου συνοψίζονται: στην ελάχιστη διαταραχή της επίγειας υποδομής, στη διατήρηση της ροής κυκλοφορίας καθ' 'όλη τη διάρκεια της κατασκευής με μικρούς μόνο περιορισμούς κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης των κιβωτίων, στη μορφή δομήματος που ασκεί χαμηλή πίεση έδρασης θεμελίωσης, και στο υψηλής ποιότητας δόμημα. Τα βασικά συστατικά μιας σήραγγας κιβωτίων είναι το ανοιχτό όρυγμα ώθησης, το ανοιχτό όρυγμα υποδοχής, η βάση ώθησης, η ασπίδα, το κιβώτιο, το σύστημα κατά της οπισθέλκουσας (ADS-Anti-Drag System), ο εξοπλισμός ώθησης, και το σύστημα στήριξης του μετώπου.

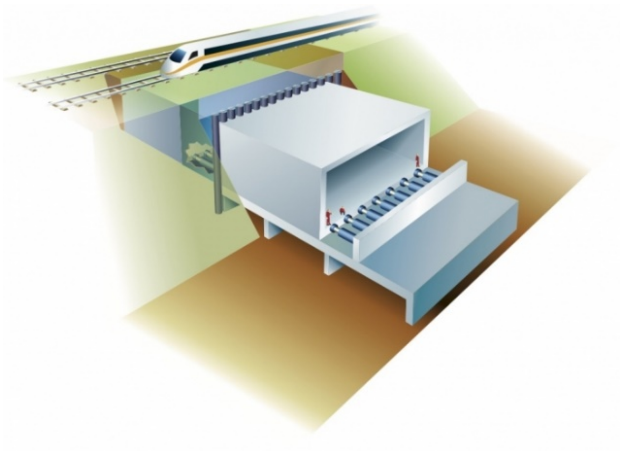


Σχήμα 9-17. Ασπίδα στο πρόσθιο μέρος του κιβωτίου

Πριν από την έναρξη της προώθησης (Σχήμα 9-16α) κατασκευάζεται το όρυγμα ώθησης αμέσως πίσω από τη θέση έναρξης της σήραγγας χρησιμοποιώντας παραδοσιακές τεχνικές εκσκαφής και υποστήριξης, κατάλληλες για τις υφιστάμενες εδαφικές συνθήκες. Μπορεί επίσης να χρειάζεται η όρυξη ενός ορύγματος υποδοχής μπροστά από τη θέση τερματισμού του ωθημένου κιβωτίου. Εντός του ορύγματος ώθησης κατασκευάζεται μια βάση ώθησης με ελαφρώς μεγαλύτερο μήκος από τα κιβώτια. Η βάση αυτή είναι κρίσιμη για την επιτυχία της ώθησης του κιβωτίου, καθώς παρέχει την απαιτούμενη αντίδραση στον εξοπλισμό ώθησης. Παρέχει επίσης ένα σταθερό δάπεδο πάνω στο οποίο κατασκευάζεται το κιβώτιο οπλισμένου σκυροδέματος, και πρέπει να είναι λείο, επίπεδο, και κατασκευασμένο με ακρίβεια. Συνήθως, το κιβώτιο αποτελείται από ένα στοιχείο, εκτός αν ο χώρος για το φρέαρ ώθησης είναι περιορισμένος ή το μήκος του είναι μεγάλο. Στο πρόσθιο

μέτωπο του κιβωτίου τοποθετείται μια ασπίδα. Κάθε ασπίδα είναι σχεδιασμένη να ταιριάζει στις εδαφικές συνθήκες, που καθορίζονται από την επιτόπου διερεύνηση, και παρέχει τη στήριξη του μετώπου που απαιτείται για τη διατήρηση της ακεραιότητας της υπερκείμενης υποδομής. Αυτή είναι συνήθως μια ασπίδα ανοιχτού μετώπου κατασκευασμένη γενικά από ξεχωριστά διαμερίσματα, με κοπτικό άκρο στο μέτωπο. Το κιβώτιο και η ασπίδα έχουν γενικά ορθογωνική διατομή (Σχήμα 9-17). Π.χ. κατά την ώθηση του κιβωτίου της υπόγειας διέλευσης του αυτοκινητόδρομου M1, J15A, το μέτωπο στηριζότανε μέσω ανοικτής ασπίδας κυψελωτής δομής από οπλισμένο σκυρόδεμα διαχωρισμένης σε τρία επίπεδα εργασίας, με επτά διαμερίσματα καθένα. Τα διαμερίσματα του άνω επιπέδου σχεδιάστηκαν για χειρωνακτική εκσκαφή, και τα μεσαία και κάτω διαμερίσματα για εκμηχανισμένη εκσκαφή. Στην περίμετρο της ασπίδας, στα οριζόντια καταστρώματα εργασίας και στους κατακόρυφους διαχωριστικούς τοίχους τοποθετήθηκαν χαλύβδινες κοπτικές ακμές, που επέτρεπαν τη διείσδυση και στήριξη του μετώπου.

Τα συστήματα ώθησης τοποθετούνται στο πίσω άκρο του κιβωτίου και (Σχήμα 9-18) αντιστηρίζονται στη βάση, σε αντίθεση με την ώθηση σωλήνων όπου οι δυνάμεις ώθησης αναλαμβάνονται γενικά από ένα τοίχωμα ώσης στο οπίσθιο μέρος ενός φρέατος.



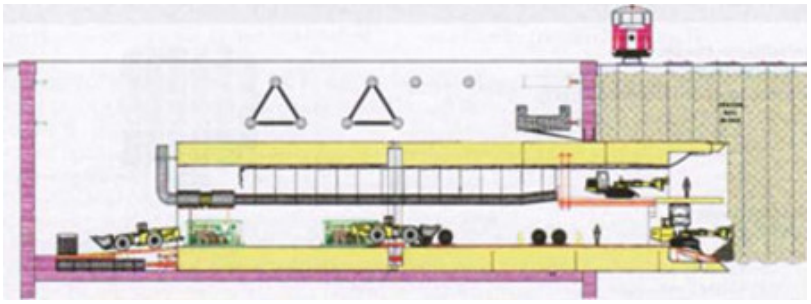
(α) Σύστημα προώθησης από πολλούς ωστήρες



(β) Σύστημα προώθησης από ζεύγος ωστήρων

Σχήμα 9-18. Προώθηση κιβωτίων

Μετά την κατασκευή του, το κιβώτιο ωθείται προς το έδαφος (Σχήμα 9-16β) , που συχνά είναι μέρος ενός επιχώματος κάτω από έναν αυτοκινητόδρομο ή σιδηρόδρομο, σε μια προσεκτικά ελεγχόμενη ακολουθία φάσεων εκσκαφής και ώσης. Η εκσκαφή πραγματοποιείται μέσα από τα διαμερίσματα της ασπίδας (Σχήμα 9-19), είτε χειρωνακτικά είτε με εκσκαφείς ή με έναν συνδυασμό των δύο. Η διάνοιξη αρχίζει με προσεκτική εκσκαφή ~150 mm του μετώπου με αντίστοιχη προώθηση του κιβωτίου, και επανάληψη, στη συνέχεια, αυτής της ακολουθίας



(α) Εκσκαφή από δάπεδα εργασίας της ασπίδας



(β) Εκσκαφή μέσα από την ασπίδα

Σχήμα 9-19. Εκσκαφή μετώπου μέσα από την ασπίδα

Το σύστημα ώθησης του κιβωτίου αποτελείται από ωστήρες, που εκτός της προώθησής του, παρέχει, σύμφωνα με τις απαιτήσεις, κάποια δυνατότητα καθοδήγησης (Σχήμα 9-20). Οι υδραυλικοί ωστήρες έχουν περιορισμένη προέκταση και γι' αυτό τοποθετούνται αποστάτες μεταξύ του υδραυλικού συστήματος και της εγκάρσιας δοκού ώστε να μεταφέρονται οι δυνάμεις στην βάση ώθησης. Μόλις οι ωστήρες φθάσουν στην πλήρη επέκτασή τους, υποχωρούν και τοποθετούνται νέοι αποστάτες. Οι απαιτούμενες δυνάμεις ώθησης υπολογίζονται με βάση την

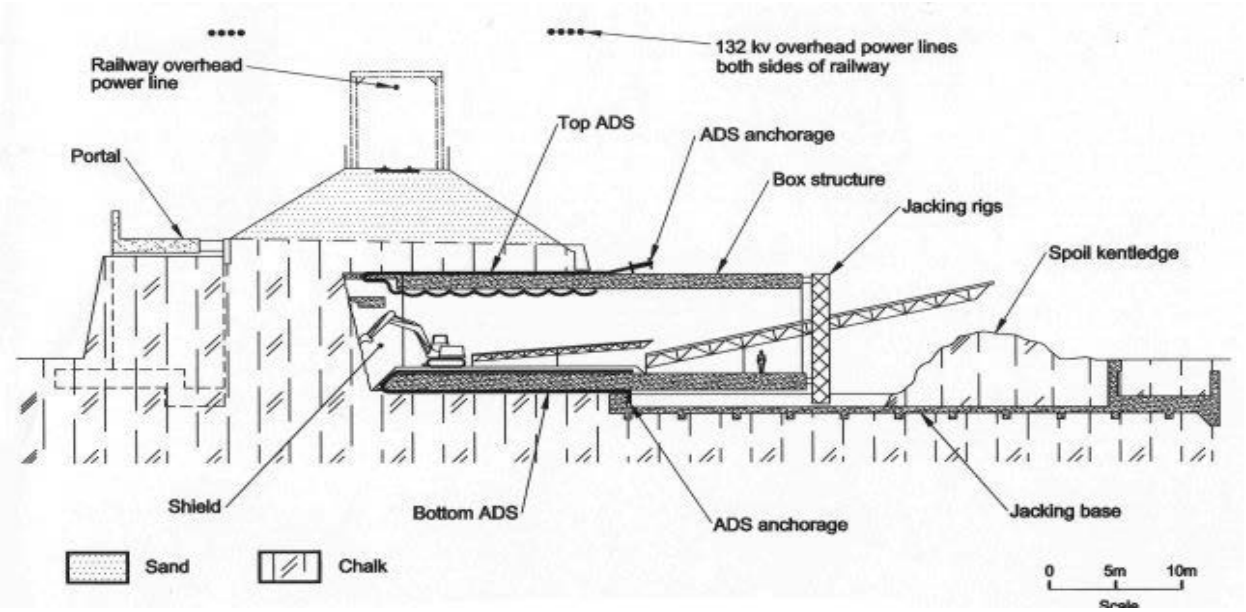
αντίσταση τριβής μεταξύ των επιφανειών του κιβωτίου και των συστημάτων αντιμετώπισης του συρσίματος (ADS), την αντίσταση τριβής και/ή πρόσφυσης μεταξύ των εκτεθειμένων επιφανειών του κιβωτίου και του εδάφους, και από τα φορτία έμπηξης της ασπίδας. Στην περίπτωση του M1, J15A, προκειμένου να δοθεί μια συνολική δύναμη ώθησης εργασίας 4800 τόνων, τοποθετήθηκαν τέσσερις ωστήρες. Εκσκαφή και ώση εναλλάσσονταν σε βήματα των 150 mm, διατηρώντας παράλληλα μια ελάχιστη διείσδυση 450 mm στο έδαφος στο μπροστινό πάνω μέρος της ασπίδας. Επτά ορύχοι σκάβανε τα διαμερίσματα του ανώτερου επιπέδου χρησιμοποιώντας αερόσφυρες για άργιλο, και μηχανικοί εκσκαφείς αποκόπτανε το υλικό από τα μεσαία και κατώτερα διαμερίσματα. Η εγκατάσταση του κιβωτίου διάρκεσε τέσσερις εβδομάδες, με διάρκεια εργασίας 24 ώρες την ημέρα, επτά ημέρες την εβδομάδα.



Σχήμα 9-20. Κιβώτιο έτοιμο για ώθηση

Ο αυτοκινητόδρομος I-90, που αποτελεί μέρος του Big Dig της Boston πέρασε κάτω από έντεκα παράλληλες ενεργές σιδηροδρομικές γραμμές. Προς τούτο εκσκάφθηκαν τρία ορύγματα ώθησης κιβωτίων. Το βάθος κάλυψης μεταξύ της οροφής των κιβωτίων της σήραγγας και των σιδηροδρομικών γραμμών ήταν περίπου 6 m. Σε κάθε ένα από αυτά τα ορύγματα κατασκευάστηκαν κιβώτια διατομής 24 m πλάτος και 12 m ύψος. Τα μήκη των τριών σηράγγων ήταν περίπου 50 m, 79 m και 115 m, αντίστοιχα. Οι δύο κοντύτερες σήραγγες κατασκευάστηκαν σε δύο τμήματα και η μεγαλύτερη σε τρία τμήματα. Ενδιάμεσοι σταθμοί ώθησης τοποθετήθηκαν μεταξύ κάθε τμήματος κιβωτίου, παρόμοιοι με αυτούς της ώθησης σωλήνων, με τους κύριους ωστήρες στο πίσω μέρος του τελευταίου κιβωτίου. Αυτό επέτρεψε σε κάθε ένα από τα κιβώτια να ωθηθούν προς τα εμπρός σε ακολουθία, μειώνοντας έτσι την ώθηση που απαιτείται από τους κύριους ωστήρες. Τα κιβώτια ωθήθηκαν με ρυθμό μεταξύ ενός και δύο μέτρων την ημέρα. Το έδαφος αποτελούνταν από την μπλε άργιλο της Boston, άμμο, χαλίκια και οργανικά υλικά που έπρεπε να σταθεροποιηθούν πριν από την εκσκαφή. Προς τούτο εφαρμόσθηκε κατάψυξη του εδάφους, χρησιμοποιώντας ως ψυκτικό ένα κλειστό σύστημα επανακυκλοφορίας ψυχρής άλμης, που διαβιβάζονταν από την επίγεια επιφάνεια προς τα κάτω μέσα από κατακόρυφους σωλήνες. Κάθε σήραγγα είχε μπροστά μια ορθογώνια ασπίδα δύο επιπέδων χωρισμένου

καθενός σε έξι διαμερίσματα. Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις εκσκαφείς με μέγεθος κατάλληλο για να εκσκάψουν ένα τυπικό διαμέρισμα πλάτους 4.2 m και ύψους 5.4 m.



Σχήμα 9-21. Σύστημα αντί-οπισθέλκουσας (ADS), στην οροφή και στο δάπεδο.

Ένα από τα βασικά προβλήματα αυτής της τεχνικής κατασκευής, είναι η τριβή μεταξύ του εξωτερικού του κιβωτίου και του περιβάλλοντος εδάφους. Κατά την προώθηση του κιβωτίου, η τριβή του με το περιβάλλον έδαφος αυξάνεται, αλλά την ίδια στιγμή το κατακόρυφο φορτίο στη βάση του μειώνεται. Για τη διατήρηση της απαιτούμενης αντίστασης αντίδρασης μεταξύ της βάσης ώθησης και του εδάφους, το εκσκαπτόμενο υλικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως έρμα για την παροχή επιπλέον κατακόρυφου φορτίου. Παρόλα αυτά, εάν δεν μειωθούν οι δυνάμεις τριβής, τότε το έδαφος, ιδιαίτερα αυτό ακριβώς πάνω από το κιβώτιο, είναι πιθανό να συρθεί κατά μήκος του κιβωτίου. Γι' αυτό αναπτύχθηκαν συστήματα αντί-οπισθέλκουσας (ADS), όπως λίπανση με πολφό μπεντονίτη. Τελευταία αναπτύχθηκε ένα σύστημα από συρματόσχοινα που μπορεί να ελέγχει αποτελεσματικά το σύρσιμο στο έδαφος. Αυτό το σύστημα (Σχήμα 9-21) χρησιμοποιεί μια σειρά από κοντινά μεταξύ τους συρματόσχοινα που εκτυλίσσονται, πάνω από την οροφή όσο και κάτω από το δάπεδο, μέσα από το μπροστινό τμήμα του κιβωτίου καθώς αυτό προωθείται. Τα συρματόσχοινα είναι τυλιγμένα σε τύμπανα που βρίσκονται εντός του κιβωτίου και το ένα άκρο του καθενός στερεώνεται έξω από το κιβώτιο. Καθώς το κιβώτιο κινείται προς τα εμπρός τα συρματόσχοινα εκτυλίσσονται από τα τύμπανα. Με αυτό τον τρόπο τα συρματόσχοινα διαμορφώνουν ένα ακίνητο στρώμα μεταξύ του εδάφους και του κινούμενου κιβωτίου. Οι δυνάμεις αντίστασης απορροφούνται από τα συρματόσχοινα και μεταφέρονται πίσω στη βάση ώθησης, απομονώνοντας το έδαφος από τις δυνάμεις της οπισθέλκουσας. Είναι σημαντικό να λιπαίνονται τα συρματόσχοινα πριν από την εγκατάσταση και να διατηρούνται καλά λιπασμένα κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης χρησιμοποιώντας κατάλληλα τοποθετημένα σημεία έγχυσης. Π.χ. κατά την υπόγεια διέλευση του αυτοκινητόδρομου M1, J15A, τα συστήματα αντί-οπισθέλκουσας για αυτό το έργο περιείχαν λιπασμένα συρματόσχοινα επάνω και κάτω από το κιβώτιο. Τα συρματόσχοινα οροφής τοποθετήθηκαν σε αξονικές αποστάσεις 26 mm και κάλυψαν το πλήρες πλάτος του κιβωτίου. Τα συρματόσχοινα διέρχονταν από σχισμές στο πρόσθιο μέρος της οροφής της ασπίδας. Το σύστημα αντί-οπισθέλκουσας του δαπέδου αποτελούνταν από δύο λωρίδες συρματόσχοινων, πλάτους 3.5 m κάθε μιας, με τα συρματόσχοινα να εφάπτονται. Η οπισθέλκουσα του εδάφους στα πλευρά του κιβωτίου μειώνονταν με λίπανση από πολφό μπεντονίτη.

Στο στόμιο εξόδου (Σχήμα 9-16γ), προκειμένου να εξασφαλιστεί η σταθερότητα του εδάφους, κατασκευάζεται ένα επίχωμα προσωρινό και ένα δόμημα στομίου. Μόλις ολοκληρωθεί η προώθηση του κιβωτίου, η ασπίδα και το σύστημα ώθησης αποσυναρμολογούνται και γίνονται τα τελειώματα στο κιβώτιο, στα δομήματα των στομίων και στις οδούς προσέγγισης. Τα συρματόσχοινα αφήνονται στη θέση τους, καθόσον τα κενά που θα άφηνε η αφαίρεσή τους θα προκαλούσαν πρόσθετη καθίζηση. Τα κενά του δακτυλίου στη διεπιφάνεια εδάφους-κιβωτίου στη συνέχεια πληρούνται χρησιμοποιώντας τσιμεντενέματα, ξεκινώντας από το δάπεδο, συνεχίζοντας στα πλευρικά τοιχώματα και τελειώνοντας πάνω από την οροφή. Κατ' αυτόν τον τρόπο περιβάλλονται και τα συρματόσχοινα με το κονίαμα και προστατεύονται από τη διάβρωση. Π.χ. αμέσως μετά

ο τέλος της ώθησης του κιβωτίου για την υπόγεια διέλευση του M1, J15A, εισπιέσθηκε με χαμηλή πίεση σημαντική ποσότητα μίγματος PFA / τσιμεντοκονιάματος, στο δάπεδο, τα πλευρικά τοιχώματα και την οροφή του κιβωτίου για την πλήρωση του δακτυλίου υπερεκσκαφής το οποίο περιέβαλε και τα συρματόσχοινα αντι-οπισθέλκουσας, προκειμένου να αποφευχθούν περαιτέρω καθιζήσεις. Οι καθιζήσεις του αυτοκινητοδρόμου μετρούνταν προσεκτικά χρησιμοποιώντας όργανα τοποθετημένα σε πύργους ύψους 9 m που κατέγραφαν μετατοπίσεις, σε πραγματικό χρόνο σε τριδιάστατες συντεταγμένες, του οδοστρώματος σε κάναβο 5x5 m. Χάρις στην προσεκτική ώθηση και εκσκαφή, η μέγιστη καταγραφείσα καθίζηση ήταν 26 mm.

Βιβλιογραφία

Atkinson JH and Mair RJ (1981). "Soil mechanics aspects of soft ground tunnelling", Ground Engineering, Vol. 14, No. 5.

Benett D, Norris C and Iseley DT (1993). "Microtunneling: Preliminary results from testing performed under the CPAR program", Proceedings of the 1993 Rapid Excavation and Tunneling Conference Boston Massachusetts June 13-17. SME of AIME pp. 109-127

Beyert J (1992). "Trends and prospects of microtunneling machine for civil engineering purposes", Proceedings of the 2rd International Symposium Microtunneling Munich/8 April, Rotterdam AA Balkema, pp 5 - 7.

CANZIAN (2001). "Manufatti in Cemento—Marmi—Pavimentazioni".

Elvidge AF (1987). "The potential for microtunnelling in th U.K", No Dig '87', 2nd International Conference and Exhibition on Trenchless Construction for Utilities,. London, April.

Grasso P & Mahtab (1995). "Design and pilot testing of a remote - controlled microtunnel boring machine (MTBM) for competent rock", Proceedings: 3rd International Symbosium On Microtunnel Constuction Munich 6-7 April. Rotterdam A.A Balkema. pp. 79-85.

Haslem RF (1986). "Pipe jacking forces: from theory to practice", Proceedings of infrastructure, Renovation and Waste control, Centenary Conference, N.W. Association , Institution of Civil Engineers.

Henry KL and Zoumaras AD (1994). "To microtunnel or to not microtunnel? The constuction of the Crown Point Trunk Sewer", Proceedings of the International Conference on Hydraulics of Pipelines, ASCE, New York. pp 73 - 81.

Holterhoff J (1995). "Pipe eating", Proceedings: 3rd International Symbosium On Microtunnel Constuction Munich 6-7 April. Rotterdam A.A Balkema. pp. 95-101.

Iseley DT (1991). "Trenchless excavation construction methods: classification and evaluation", (Committee on Construction Equipment & Management), Journal of Construction Engineering and Management. Vol 117, No 3, Sept, ASCE. pp. 521-536.

Kirsch G (1898). " Die Theorie der Elastizität und die Bedürfnisse der Festigkeitslehre", Veit. Ver. Deut. Ing. 42, 797-807.

Milligan G and Noris P (1992). "Pipe jacking; Research results and recommendations", Pipe Jacking Association.

Mohring K (1992). "Contributions of the contract placing authority to the economic efficiency of microtunnelling technology", Proceedings of the 2rd International Symposium Microtunneling Munich/8 April, Rotterdam A.A. Balkema. pp 79 - 89.

Moss AF (1989). "Microtunnelling for contractors", Proceedings of No - Dig Conference. Rotterdam.

Moss AF (1993). "Mucking systems for pipe jacking and microtunnelling", Tunnels and Tunnelling, May. pp 23 - 25.

O' Reilly MP and New BM (1982). "Settlements above tunnels in the United Kingdom – their magnitude and prediction", Proceedings Tunnelling '82, I.M.M., London, pp. 173-181.

PJA (1995a). "Guide to best practice for the installation of pipe jacks and microtunnels".

PJA (1995b). "An introduction to pipe jacking and microtunnelling design".

Pellet F, Descoeudres F, Egger P (1993). "The effect of water seepage forces on the face stability of an experimental microtunnel", Canadian Geotechnical Journal. 30, pp 363 -369.

Rokahr R (1995). "Trenchless construction of sewage house connections in ground water - bearing soil", Proceedings: 3rd International Symbosium On Microtunnel Constuction Munich 6-7 April. Rotterdam A.A Balkema. pp 25 - 41.

Skempton A & McDonald (1956). "The allowable settlement of buildings", Proc. of the Institution of Civ.Eng., London, 5, III, p. 727-768.

Sofianos AI, Loukas P, Chantzakos Ch (2004). "Pipe jacking a sewer under Athens", TUST.19, 193-203.

Stein D, Möllers K, Bielecki R (1989). "Microtunnelling". Verlag Ernst & Sohn, Berlin.

Τεπασκουάλος Φ & Σοφιανός ΑΙ (2003a). «Υπόγεια ανακαίνιση δικτύων ύδρευσης-αποχέτευσης, Μέρος Ι: Αποκατάσταση αγωγών. Ο κύριος αγωγός ύδρευσης της ΕΥΔΑΠ στη Χελιδονού», Ορυκτός Πλούτος, 126, 19-30.

Τεπασκουάλος Φ & Σοφιανός ΑΙ (2003b). «Υπόγεια ανακαίνιση δικτύων ύδρευσης-αποχέτευσης, Μέρος ΙΙ: Αντικατάσταση αγωγών», Ορυκτός Πλούτος, 126, 31-44.

Thomson JC (1993). "Pipejacking and Microtunnelling", Blackie Academic & Professional.

Zeevaert L (1973). "Foundation engineering for difficult subsoil conditions", Van Nostrand Reinhold.

Ψωμάς Σ (1995). "Διάνοιξη μικροσηράγγων", Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μ.Μ.Μ.,Ε.Μ.Π.

Κριτήρια αξιολόγησης

Κριτήριο αξιολόγησης 1. Ώθηση σωλήνων σε υπερστερεοποιημένη άργιλο

Για την κατασκευή αγωγού μεταφοράς ακαθάρτων υδάτων, μήκους 150m, πρόκειται να πραγματοποιηθεί υπόγεια διάνοιξη σήραγγας. Η εκσκαφή θα πραγματοποιηθεί χειρωνακτικά εμπρός από ασπίδα η οποία θα ωθείται από σωλήνες σκυροδέματος ονομαστικής (εσωτερικής) διαμέτρου 1.5m. Το βάθος, στο εσωράχειο του ανάστροφου τόξου της εκσκαφής, είναι 12m. Τα άκρα των σωλήνων διαμορφώνονται με χαλύβδινη στεφάνη και χωρίς εγκοπή. Στους αρμούς των σωλήνων, μεταξύ των στεφάνων, τοποθετούνται παρεμβύσματα από MDF.

Τα ανώτερα 7m του εδαφικού σχηματισμού αποτελούνται από συμφύρματα υγρών αμμοχάλικων και υπέρκεινται σκληρής υπερστερεοποιημένης αργίλου. Το κορεσμένο φαινόμενο βάρος των αργιλικών (γ_2) υλικών και των αμμωδών (γ_1) υλικών προσδιορίσθηκε σε 21kN/m^3 και 19kN/m^3 αντίστοιχα. Ο αριθμός κρούσεων N_{SPT} της πρότυπης δοκιμής διείσδυσης προσδιορίσθηκε στο βάθος της διάνοιξης ότι είναι N_{SPT}=30. Ο συντελεστής πλευρικής ώθησης ηρεμίας για το συγκεκριμένο σχηματισμό έχει προσδιορισθεί σε 1.6.

Η αστράγγιστη διατμητική αντοχή c_u για την υπόψη άργιλο (όπως π.χ. η άργιλος του Λονδίνου ή της Οξφόρδης) υπολογίζεται με βάση τον αριθμό κρούσεων N_{SPT} από τη σχέση : c_u(kPa)=$k_c \cdot N_{SPT}$. Τυπική τιμή του συντελεστή k_c είναι 4.5, και αυξάνει μέχρι 6 για αργίλους χαμηλής πλαστικότητας. Λαμβάνοντας για τη συγκεκριμένη άργιλο k_c=4.5, η αστράγγιστη διατμητική αντοχή c_u εκτιμάται 135kPa (πρβ. Zeevaert, 1973, p.142; για πολύ στιφρό έως σκληρό έδαφος, c_u=200kPa).

Το αστράγγιστο μέτρο ελαστικότητας E_s υπολογίζεται για μικρές παραμορφώσεις του συγκεκριμένου σχηματισμού από τη σχέση $E_s = 750 \cdot c_u = 750 \cdot 0.135 = 100$MPa. Ο λόγος Poisson λαμβάνεται ν=0.5. Για στραγγιζόμενες συνθήκες λαμβάνεται, $E' = 0.8 E_s$.

Η τριβή μεταξύ σωλήνα και εδάφους, για αντίστοιχες συνθήκες έχει μετρηθεί σε γειτονικές διανοίξεις 54kN/m (π.χ. Milligan & Norris, 1992, Fig. 5.3). Λαμβάνοντας υπόψη της αύξηση της αντίστασης μετά από σταματήματα, που εκτιμάται σε 50% (π.χ. Milligan & Norris, 1992, Fig. 4.9), η μέγιστη τριβή μεταξύ σωλήνας και εδάφους δύναται να ληφθεί 81kN/m. Η αντίσταση του κοπτικού άκρου, στην περιφέρεια της ασπίδας, στο μέτωπο εκτιμάται σε 300kN (π.χ. Milligan & Norris, 1992, Table 5.1, p.9).

Βάσει των στοιχείων που δίδονται ανωτέρω να μελετηθεί ο τρόπος διάνοιξης, αφού διερευνηθούν:

- Η ευστάθεια του μετώπου
- Η βραχυχρόνια ευστάθεια της διάτρησης
- Η βραχυχρόνια και μακροχρόνια ελαστική σύγκλιση του υπεδάφους
- Η βραχυχρόνια τοπική διαρροή του υπεδάφους
- Η μακροχρόνια καθίζηση
- Η τριβή των σωλήνων και η φόρτιση των αρμών τους
- Η ώθηση σχεδιασμού του τοιχίου στο φρέαρ εκκίνησης

Στον επόμενο πίνακα δίνονται συγκεντρωτικά τα δεδομένα της διάνοιξης. Οι διαστάσεις του σωλήνα έχουν ληφθεί, από πίνακα κατασκευαστή, με βάση την ονομαστική του διάμετρο.

Πίνακας 9-5. Ανακεφαλαίωση των δεδομένων της διάνοιξης

Στοιχεία του έργου	Σύμβολο	Μήκος
Εσωτερική διάμετρος του σωλήνα	d	1470 mm
Εξωτερική διάμετρος του σωλήνα	D_p	1800 mm
Πάχος τοιχώματος του σωλήνα	t	165 mm
Βάθος στο ανάστροφο εσωράχειο του σωλήνα	z_i	12.00 m
Βάθος στον άξονα του σωλήνα (=z_i – d/2)	z_a	11.25 m
Μήκος της διάνοιξης	L	150 m
Βάθος υδροφόρου ορίζοντα (από την επιφάνεια)	z_w	1.50 m
Φαινόμενο βάρος κορεσμένου αμμοχάλικου	γ_1	19 kN/m^3
Φαινόμενο βάρος κορεσμένης αργίλου	γ_2	21 kN/m^3
Αριθμός κρούσεων αργίλου	N_{SPT}	30

Αστράγγιστη διατμητική αντοχή αργίλου	c_u	135 kPa
Αστράγγιστο μέτρο ελαστικότητας αργίλου	E_s	100 MPa
Αστράγγιστος λόγος του Poisson αργίλου	ν_s	0.5
Στραγγίζόμενο μέτρο ελαστικότητας αργίλου	E'	$0.8 \cdot E_s$
Συντελεστής πλευρικής ώθησης ηρεμίας αργίλου	K'_0	1.6
Φαινόμενο βάρος σκυροδέματος	γ_c	24 kN/m^3
Μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος	E_c	40 GPa
Λόγος Poisson σκυροδέματος	ν_c	0.2
Μέγιστη γωνία απόκλισης από την ευθυγραμμία	β	0.5^o
Τριβή μεταξύ σωλήνας και εδάφους	q_f	81 kN/m
Αντίσταση του κοπτικού άκρου της ασπίδας	Q_{Fe}	300 kN

Απάντηση/Λύση

Πιέσεις και τάσεις στο υπέδαφος

Η κατακόρυφη τάση στον άξονα της σήραγγας είναι:

$\sigma_{va}=7 \cdot 19+4.25 \cdot 21=222$ kPa

Η πίεση πάνω από την άργιλο δύναται να θεωρηθεί υδροστατική, άρα η πίεση του νερού στον άξονα της σήραγγας είναι:

$u_a=(11.25-1.5) \cdot 10=97.5$ kPa

Η ενεργή κατακόρυφη τάση στον άξονα της σήραγγας είναι:

$\sigma'_{va}=\sigma_{va}-u_a=124.5$ kPa

Η ενεργή οριζόντια τάση στον άξονα της σήραγγας είναι:

$\sigma'_{ha}=K'_0 \cdot \sigma'_{va}=1.6 \cdot 124.5=200$ kPa

Η ολική οριζόντια πίεση στον άξονα της σήραγγας είναι:

$\sigma_{ha}=\sigma'_{ha}+u_a=298$ kPa

Το βάρος των σωλήνων είναι:

$w_c=(D_p^2-d^2) \cdot \gamma_c \cdot \pi/4=(1.80^2-1.47^2) \cdot 24 \cdot \pi/4=20.3$kN/m

Ευστάθεια μετώπου

Η ευστάθεια του μετώπου απαιτεί πίεση σ_T που θα αντιστηρίζει το μέτωπο αλλά δεν θα ξεπερνά την παθητική αντοχή του. Η πίεση αυτή πρέπει να βρίσκεται στο διάστημα που καθορίζεται από την επόμενη σχέση:

$$\sigma_{va}+T_c \cdot \frac{c_u}{FS_c} > \sigma_T > \sigma_{va}-T_c \cdot \frac{c_u}{FS_c} \tag{9-2}$$

όπου T_c συντελεστής ευστάθειας που δίνεται από το διάγραμμα (Atkinson and Mair, 1981) στο (Σχήμα 9-9), σα συνάρτηση των λόγων H/D_e και P/D_e.

Η απόσταση P από το μέτωπο, της υποστήριξης της διάνοιξης από την ασπίδα, είναι μηδέν. Άρα, $P/D_e=0$. Το βάθος H των υπερκειμένων πάνω από την στέψη είναι:

$H= z_i-d/2-t= 12.00-1.47-0.165= 10.4$m => $H/D_e \approx H/D_p=10.4/1.80=5.75$ => $T_c=9$ (από το διάγραμμα)

Στην εξίσωση 1, η τιμή του c_u διαιρείται με έναν συντελεστή ασφαλείας $FS_c=1.5 \div 2$. Επομένως:

$$222+9 \cdot \frac{135}{2}=830 \geq \sigma_T[kPa] \geq -385=222-9 \cdot \frac{135}{2}$$

Παρατηρούμε ότι δεν απαιτείται στήριξη του μετώπου ($\sigma_T=0$). Ο συντελεστής ασφαλείας θα είναι τότε: $FS_c=9 \cdot 135/222>5$.

(Βραχυχρόνια) Ευστάθεια της διάτρησης

Ο έλεγχος πραγματοποιείται και πάλι με το διάγραμμα που δίνεται στο (Σχήμα 9-9). Στην περίπτωση αυτή όμως η απόσταση της στήριξης $P=\infty$, δηλαδή πολύ πίσω από την ασπίδα. Άρα,

$T_c(H/D_e=5.75, P/D_e=\infty)=4.2$

Σε συνέχεια ελέγχεται με βάση τη σχέση 1, αν απαιτείται να ασκηθεί πίεση σ_T στα τοιχώματα. Ο συντελεστής ασφαλείας της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής c_u λαμβάνεται, όπως και προηγουμένως, FS_c=2.

$$\sigma_T > 222 - 4.2 \cdot \frac{135}{2} = -61kPa$$

Επομένως δεν απαιτείται η άμεση άσκηση πίεσης στα τοιχώματα. Ο συντελεστής ασφαλείας FS_c=4.2·135/222=2.5

Ελαστική σύγκλιση της διατομής

Η ελαστική βράχυνση δ_v και δ_h, της κατακόρυφης και οριζόντιας διαμέτρου αντίστοιχα, δίνονται (προκύπτουν από τις εξισώσεις του Kirsch,) από τις σχέσεις :

$$\delta_v = \frac{1-\nu_s^2}{E_s} \cdot D_e \cdot \left(3 \cdot \sigma_{va} + \sigma_{ha}\right)$$

$$\delta_h = \frac{1-\nu_s^2}{E_s} \cdot D_e \cdot \left(3 \cdot \sigma_{ha} + \sigma_{va}\right)$$

(9-3)

Για αστράγγιστες (βραχυχρόνιες) συνθήκες, αμέσως μετά την εκσκαφή, η βράχυνση της κατακόρυφης και οριζόντιας διαμέτρου υπολογίζεται από τις προηγούμενες εξισώσεις για, σ_{va}=222kPa, σ_{ha}=298kPa, E_s=100MPa, ν=0.5, D_p=1.8m:

δ_v=13.0mm, δ_h=15.1mm

Για μακροχρόνιες συνθήκες, η παραμόρφωση αυξάνεται λόγω στράγγισης. Στις παραπάνω σχέσεις αντικαθιστούμε το αστράγγιστο μέτρο ελαστικότητας E_s με το στραγγιζόμενο $E' = 0.8 \cdot E_s$. Οι μετακινήσεις υπολογίζονται :

δ_v'=13.0/0.8=16.3mm, δ_h'=15.1/0.8=18.8mm

Οι παραπάνω μετακινήσεις υποδεικνύουν, προκειμένου να αποφευχθεί η επαφή του σωλήνα με το περιβάλλον έδαφος, λόγω της σύγκλισης, την υπερεκσκαφή της σήραγγας με διάμετρο εκσκαφής κατά 20mm τουλάχιστον μεγαλύτερη της διαμέτρου του σωλήνα. Προτείνεται υπερεκσκαφή 25mm.

(Βραχυχρόνια) Τοπική διαρροή του εδάφους

Τοπική διαρροή του εδάφους γύρω από τη σήραγγα συμβαίνει όταν οι εφαπτομενικές τάσεις στην περιφέρεια της εκσκαφής ξεπεράσουν την αντοχή του. Ο έλεγχος γίνεται συνήθως στη στέψη (σημείο C) και στις παρειές (σημείο A). Για μη πιεζόμενη εσωτερικά σήραγγα, οι εφαπτομενικές τάσεις είναι $\sigma_{\theta C}$ και $\sigma_{\theta A}$ στη στέψη και στις παρειές αντίστοιχα. Εφόσον τα τοιχώματα της σήραγγας πιέζονται από μέσα με πίεση σ_T, και οι συνθήκες είναι αστράγγιστες (η αντοχή του εδάφους είναι $2 \cdot c_u$), τότε η συνθήκη ευστάθειας δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_{\theta C} - \sigma_T < 2c_u, \sigma_{\theta A} - \sigma_T < 2c_u$$

(9-4)

Οι $\sigma_{\theta C}$ και $\sigma_{\theta A}$ (Kirsch,) υπολογίζονται για αστράγγιστες συνθήκες από τις σχέσεις:

$K=\sigma_{ha}/\sigma_{va}$=298/222=1.34

$\sigma_{\theta C}=(-1+3K)\cdot\sigma_v=(-1+3\cdot1.34)\cdot222$=666kPa

$\sigma_{\theta A}=(3-K)\cdot\sigma_v=(3-1.34)\cdot222$=368kPa

(9-5)

Παρατηρούμε ότι οι εφαπτομενικές τάσεις στην περιφέρεια της εκσκαφής υπερβαίνουν την αστράγγιστη αντοχή του εδάφους:

$2 \cdot c_u$=270kPa

Επομένως, η διαρροή δύναται να αποφευχθεί μόνον εφόσον γίνει εισπίεση κατάλληλου πολφού με πίεση:

$\sigma_T=\sigma_\theta-2c_u=666-270\approx400kPa$

(9-6)

Εφόσον επιτραπεί τοπική διαρροή, η εκτίμηση της πίεσης μεταξύ σωλήνα και υπεδάφους δεν είναι δυνατό να εκτιμηθεί εκτός εάν γίνει ειδική ανάλυση με πολύπλοκα αριθμητικά προσομοιώματα. Εν τούτοις, οι ασκούμενη πίεση του εδάφους πάνω στο σωλήνα δύναται να μειωθεί σημαντικά με την αύξηση της αρχικής υπερεκσκαφής, και εφόσον οι καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους δεν προκαλούν σημαντικό πρόβλημα, η υπερεκσκαφή μπορεί να φθάσει τα 40mm κατά τη διάμετρο.

Καθίζηση του εδάφους

Εφόσον πραγματοποιηθεί υπερεκσκαφή της σήραγγας:

$\Delta D_p=40mm$

τότε θα απολεσθεί όγκος V_s, που θα πρέπει να συμπληρωθεί από το περιβάλλον έδαφος. Για πλήρες κλείσιμο του κενού μεταξύ εδάφους και παρειών σωλήνα, ο όγκος υπολογίζεται:

$V_s=[(D_p+\Delta D_p)^2-D_p^2)\cdot\pi/4=(1.84^2-1.80^2)\cdot\pi/4=0.1144\ m^3/m$

(9-7)

Η απώλεια εδάφους στο μέτωπο, λόγω της πολύ μεγάλης ευστάθειάς του, μπορεί να αγνοηθεί. Για συνεκτικά εδάφη, η απόσταση i του σημείου καμπής δίνεται (O' Reilly & New, 1982) από τη σχέση :

$i=0.43\cdot z_a+1.1=0.43\cdot11.25+1.1=5.94m$

(9-8)

Για κανονική κατανομή της καθίζησης (Σχήμα 5), η μέγιστη καθίζηση υπολογίζεται:

$$S_{\max}=\frac{V_s}{i\cdot\sqrt{2\pi}}=\frac{0.1144}{5.94\cdot\sqrt{2\cdot\pi}}=7.7mm$$

(9-9)

Εφόσον αποφασισθεί υπερεκσκαφή 50mm, τότε ο όγκος V_s του εδάφους που θα απολεσθεί και η μέγιστη καθίζηση S_{max} υπολογίζονται σε 0.143 m^3/m και 9.6 mm αντίστοιχα. Και στις δύο περιπτώσεις η έκταση της καθίζησης υπολογίζεται ίση με :

$6\cdot i=6\cdot5.94\approx36m$

(9-10)

Η μέγιστη κλίση της καθίζησης, στην επιφάνεια του εδάφους, συμβαίνει στο σημείο καμπής της κατανομής της καθίζησης.

$$\frac{dS(y=i)}{dy}=0.606\cdot\frac{S_{\max}}{i}=0.606\cdot\frac{9.6}{5.94\cdot10^3}=\frac{1}{620}$$

(9-11)

Για μια τέτοια, μεγάλης έκτασης και μικρού μεγέθους, καθίζηση, και επομένως μικρής διαφορικής καθίζησης (Skempton & McDonald, 1956), δεν αναμένεται να δημιουργηθούν προβλήματα, εκτός εάν ευαίσθητες κατασκευές ή δίκτυα εξυπηρέτησης βρίσκονται πάνω από τον αγωγό.

Ώθηση των σωλήνων

Θεωρούμε παρεμβύσματα από MDF στους αρμούς μεταξύ των σωλήνων. Αυτά έχουν πλάτος 130mm, πάχος 18mm, και τοποθετούνται σε απόσταση 15mm από την εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα (προκειμένου να αποφευχθεί θραύση του σκυροδέματος στο άκρο).

Έστω ότι επιτρέπεται στους αρμούς μέγιστη απόκλιση 0.5° από την ευθυγραμμία. Θεωρώντας συνήθη κριτήρια μελέτης, και στοιχεία που δίνονται από τους κατασκευαστές των σωλήνων (διάγραμμα στο Σχήμα 6), η μέγιστη δύναμη ώθησης είναι $Q_{JP}=4300kN$ (440t).

Επειδή θα υπάρξει κάποια τοπική διαρροή του περιβάλλοντος εδάφους, δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι η αντίσταση τριβής των σωλήνων οφείλεται μόνο στην ολίσθηση τους στον πυθμένα της διάνοιξης. Η εκτίμηση

της αντίστασης τριβής δίνεται από μετρήσεις παρόμοιων διανοίξεων, με βάση τις οποίες έχει γίνει εκτίμηση της αντίστασης τριβής σχεδιασμού q_f=81kN/m. Η τιμή αυτή θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την αντίσταση ολίσθησης στον πυθμένα ευσταθούς ανοίγματος. Η αντίσταση αυτή $\underline{q_f}$ υπολογίζεται από τον Haslem (1986) ως εξής:

$$k_d = \frac{D_e \cdot D_p}{D_e - D_p} = \frac{1.840 \cdot 1.800}{0.040} = 82.8m$$

(9-12)

$D_e=D_p+\Delta D_p=1.800+0.040=1.840$m

$$C_e = \frac{1-\nu_s^2}{E_s} + \frac{1-\nu_c^2}{E_c} = \frac{1-0.5^2}{100} + \frac{1-0.2^2}{40 \cdot 10^3} = 0.0094 + 0.000024 = 0.0094 / MPa$$

(9-13)

$$b = 1.6 \cdot \sqrt{w_c \cdot k_d \cdot C_e} = 1.6 \cdot \sqrt{0.0203 \cdot 82.8 \cdot 0.0094} = 0.20m$$

(9-14)

όπου b το πλάτος της επιφάνειας ολίσθησης,

$\underline{q_f}=\alpha \cdot c_u \cdot b=135 \cdot 0.20=27$kN/m≈<54kN/m<81kN/m(=1.5·54kN/m)

(9-15)

όπου ως $\alpha \cdot c_u$ ελήφθη η αστράγγιστη διατμητική αντοχή της αργίλου.

Επομένως το μήκος L_{iJ} των σωλήνων μεταξύ των ενδιάμεσων θέσεων προώθησης υπολογίζεται, για δεδομένη την αντίσταση τριβής q_f των σωλήνων, σε :

$L_{iJ}=Q_{JP}/q_f=4300/81=53$m

(9-16)

Για το πρώτο μήκος θα πρέπει να συμπεριληφθεί η αντίσταση του κοπτικού άκρου της ασπίδας στο μέτωπο: Q_{Fe}=300kN
Το πρώτο μήκος L_{1J} της σωλήνωσης επομένως πρέπει να είναι μικρότερο από:

$L_{1J}=(Q_{JP}-Q_{Fe})/q_f=(4300-300)/81=49$m

(9-17)

Επιλέγεται η πρόβλεψη τριών ενδιάμεσων σταθμών προώθησης. Ο πρώτος τίθεται μετά από 18 σωλήνες, ήτοι στα 2.5·18=45m. Ο δεύτερος τίθεται μετά την 38η σωλήνα, ήτοι στα 38·2.5=95m. Ο τρίτος τίθεται μετά την 58 σωλήνα, ήτοι στα 58·2.5=145m. Η επιτόπου καταγραφή και παρακολούθηση της προώθησης, και η λίπανση των σωλήνων, δύνανται να επιτρέψουν την αύξηση των ενδιάμεσων μηκών μεταξύ των σταθμών προώθησης, και πιθανόν την αποφυγή της τοποθέτησης του τρίτου ενδιάμεσου σταθμού προώθησης.

<u>Τοιχίο ώθησης</u>
Η δύναμη Q_w της ώθησης, που θα πρέπει να μπορεί να αναλάβει το τοιχίο εντός του φρέατος, θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη επιτρεπόμενη ώθηση Q_{JP} των σωλήνων πολλαπλασιασμένη με ένα συντελεστή ασφαλείας FS_w=1.5. Επομένως:

$Q_w=FS_w \cdot Q_{JP}=1.5 \cdot 4300 \approx 6500$kN

(9-18)

<u>Σύνοψη της επιλεγμένης λύσης</u>
Ευστάθεια μετώπου: Πολύ ευσταθές. Συντελεστής ασφάλειας: ~5
Ευστάθεια διάτρησης: Πολύ ευσταθής. Συντελεστής ασφάλειας: ~2.5

Ελαστική σύγκλιση υπεδάφους: Προκειμένου να αποφευχθεί ελαστική παραμόρφωση αποτόνωσης του εδάφους, που θα προκαλέσει επαφή με τη σωλήνωση, θα πρέπει να γίνει υπερεκσκαφή 25mm κατά τη διάμετρο.
Τοπική διαρροή του υπεδάφους: Τοπική διαρροή θα συμβεί εκτός εάν πιεσθεί με 400 kPa κατάλληλος λιπαντικός πολφός.
Η πίεση επαφής μπορεί να μειωθεί εφόσον η υπερεκσκαφή αυξηθεί σε 40mm, και αυτό ελεγχθεί αν είναι αποδεκτό από πλευράς καθιζήσεων.
Καθίζηση στην επιφάνεια του εδάφους: Ακόμη και για υπερεκσκαφή 50mm η καθίζηση θα είναι πλατιά και αβαθής. Ως εκ τούτου δεν αναμένεται να προκαλέσει προβλήματα εκτός εάν υπάρχουν πάνω από τη διάνοιξη ευαίσθητες κατασκευές ή δίκτυα.
Ενδιάμεσοι σταθμοί ώθησης: Εφόσον γίνει χρήση παρεμβυσμάτων πλάτους 130mm, και επιτραπεί μέγιστη γωνιακή απόκλιση στους αρμούς 0.5^{o}, το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο στο σωλήνα είναι 4300kN. Για την εκτιμωμένη τριβή, θα πρέπει να γίνει πρόβλεψη τριών ενδιάμεσων σταθμών ώθησης, στα 45m, 95m και 145m. Ο αριθμός αυτός των ενδιάμεσων σταθμών είναι δυνατό να μειωθεί κατά την εφαρμογή, εφόσον οι μετρήσεις παρακολούθησης δείξουν μικρότερες τιμές της τριβής.
Ώθηση στο τοιχίο. Κάνοντας χρήση ενός συντελεστή ασφάλειας 1.5, προτείνεται ο τοίχος ώθησης να σχεδιασθεί ώστε να αναλαμβάνει φορτίο 6500kN.
Παρακολούθηση και καταγραφή: Κατά τη διάνοιξη θα πρέπει να καταγράφονται τα γεωμετρικά στοιχεία της διάνοιξης, τα φορτία ώθησης, και τα γεωλογικά στοιχεία, τα οποία θα πρέπει να παρουσιάζονται σε κατάλληλα διαγράμματα παρακολούθησης. Στα γεωμετρικά στοιχεία συμπεριλαμβάνονται ο αριθμός του τελευταίου εισερχόμενου σωλήνα, η θέση του μετώπου, και η οριζόντια και κατακόρυφη απόκλιση στο πρόσθιο και οπίσθιο άκρο της ασπίδας. Στα φορτία ώθησης συμπεριλαμβάνονται τα εφαρμοζόμενα, στον κύριο και τους ενδιάμεσους σταθμούς, καθώς και η εφαρμογή και το είδος λίπανσης. Στα γεωτεχνικά στοιχεία συμπεριλαμβάνονται οι εδαφικές συνθήκες, και η ύπαρξη ή εισροή νερού.

Αναγνώριση: Ακολουθήθηκε η μεθοδολογία που προτείνεται μέσω παραδειγμάτων από την PJA (1995a).

Κριτήριο αξιολόγησης 2. Ώθηση σωλήνων σε αμμοχάλικα υπό τον υδροφόρο

Αγωγός μεταφοράς ακαθάρτων πρόκειται να κατασκευασθεί με υπόγεια διάνοιξη σήραγγας. Προς τούτο θα χρησιμοποιηθεί ένα TBM ασπίδας και πολφού που θα προωθείται από σωλήνωση ονομαστικής (εσωτερικής) διαμέτρου 1.8m. Το μήκος διάνοιξης είναι L=300m, και το εσωράχειο του ανάστροφου τόξου βρίσκεται σε βάθος z_l=7m. Οι σωλήνες είναι από οπλισμένο σκυρόδεμα. Τα άκρα των σωλήνων διαμορφώνονται με χαλύβδινη στεφάνη και χωρίς εγκοπή. Στους αρμούς των σωλήνων, μεταξύ των στεφάνων, τοποθετούνται παρεμβύσματα από MDF.

Το έδαφος διάνοιξης αποτελείται από συμφύρματα υγρών αμμοχάλικων. Το κορεσμένο φαινόμενο βάρος τους προσδιορίσθηκε γ_s=19.5kN/m^3. Ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται σε βάθος 2m από την επιφάνεια. Ο αριθμός κρούσεων της πρότυπης δοκιμής διείσδυσης προσδιορίσθηκε σε N_{SPT}=25. Εφόσον δεν υπάρχουν στοιχεία από εργαστηριακές ή επιτόπου δοκιμές, η γωνία εσωτερικής τριβής των εν λόγω μη συνεκτικών σχηματισμών δύναται να εκτιμηθεί, με σχετική αξιοπιστία για την εκτέλεση προκαταρκτικών υπολογισμών, από τον επόμενο και τα αποτελέσματα δοκιμών πρότυπης διείσδυσης.

Πίνακας 9-6. Σχετική πυκνότητα και γωνίας εσωτερικής τριβής (Peck et al., 1974)

Σχετική πυκνότητα	Αριθμός κρούσεων N_{SPT}	Γωνία εσωτερικής τριβής φ΄
πολύ χαλαρό	<4	<29^o
χαλαρό	4-10	29-30^o
μέσης πυκνότητας	10-30	30-36^o
πυκνής απόθεσης	30-50	36-41^o
πολύ πυκνής απόθεσης	>50	>41^o

Η γωνία τριβής δ μεταξύ μη συνεκτικού εδάφους και σωλήνων από σκυρόδεμα βρίσκεται συνήθως στο διάστημα $0.7\cdot\varphi<\delta<0.9\cdot\varphi$ Κατά το σχεδιασμό της ώθησης σωλήνων προτείνεται η θεώρηση των ανώτερων τιμών του διαστήματος, ώστε να μη γίνει υποεκτίμηση της αντίστασης τριβής.

Το στραγγιζόμενο μέτρο ελαστικότητας μπορεί να εκτιμηθεί από τη σχέση: $E'_s[MPa]=4\cdot N_{SPT}$. Ο αντίστοιχος λόγος του Poisson δύναται να ληφθεί ν_s'=0.2.

Η αντίσταση του κοπτικού άκρου της ασπίδας εκτιμάται σε Q_{Fe}=200kN. Η αντίσταση q_{fs} τριβής λιπαντικού/εδάφους εκτιμάται σε 0.5kN/m. Τυχούσες αποκλίσεις από την ευθυγραμμία επαυξάνουν την αντίσταση τριβής κατά 20%. Η μέγιστη γωνία απόκλισης από την ευθυγραμμία εκτιμάται σε 0.5^o.

Βάσει των στοιχείων που δίδονται ανωτέρω και αφορούν στις επί τόπου συνθήκες, να επιλεγεί ο τρόπος διάνοιξης, αφού διερευνηθούν τα εξής :

- Η ασκούμενη πίεση στο μέτωπο
- Η ασκούμενη δύναμη στην περιοχή του μετώπου
- Η ευστάθεια της διάτρησης
- Η ελαστική σύγκλιση του υπεδάφους
- Η καθίζηση του εδάφους
- Η τριβή των σωλήνων
- Η φόρτιση των αρμών
- Η μέγιστη ασκούμενη δύναμη στο τοιχίο ώθησης

Στον επόμενο πίνακα δίνονται συγκεντρωτικά τα δεδομένα της διάνοιξης. Τα στοιχεία του σωλήνα έχουν ληφθεί από πίνακες κατασκευαστή με βάση την ονομαστική του διάμετρο.

Πίνακας 2. Ανακεφαλαίωση των δεδομένων της διάνοιξης

Στοιχεία του έργου	Σύμβολο	Μήκος
Εσωτερική διάμετρος του σωλήνα	d	1800 mm
Εξωτερική διάμετρος του σωλήνα	D_p	2120 mm
Πάχος τοιχώματος του σωλήνα	t	160 mm
Βάθος στο ανάστροφο εσωράχειο του σωλήνα	z_i	7.00 m
Βάθος στον άξονα του σωλήνα	z_a	6.10 m
Μήκος της διάνοιξης	L	300 m
Βάθος υδροφόρου ορίζοντα (από την επιφάνεια)	z_w	2.00 m
Φαινόμενο βάρος κορεσμένου αμμοχάλικου	γ_s	19.5 kN/m^3
Αριθμός κρούσεων	N_{SPT}	25
Γωνία τριβής εδάφους, σχεδιασμού	φ΄	33^o
Γωνία τριβής εδάφους-σωλήνα	δ	0.87·φ΄≈28^o
Στραγγισμένο μέτρο ελαστικότητας	E_s΄[MPa]	4xN_{SPT}=100 MPa
Στραγγισμένος λόγος του Poisson	ν_s΄	0.2
Φαινόμενο βάρος του σκυροδέματος	γ_c	24kN/m^3
Μέγιστη γωνία απόκλισης από την ευθυγραμμία	β	0.5^o
Αντίσταση κοπτικού άκρου της ασπίδας	Q_{Fe}	200 kN
Αντίσταση τριβής λιπαντικού/εδάφους	q_{fs}	0.5 kN/m
Τριβή λόγω απόκλισης από την ευθυγραμμία	q_{fm}	20%·(q_f-q_{fm})

Απάντηση/Λύση

Προϋπάρχουσες πιέσεις και τάσεις στο υπέδαφος

Η πίεση του νερού στον άξονα της σήραγγας u_a=4.1·10=41kPa

Η κατακόρυφη ολική τάση στον άξονα της σήραγγας είναι : σ_{va}=6.1·19.5=119kPa

Η ενεργή κατακόρυφη τάση στον άξονα της σήραγγας είναι : σ_{va}΄=119-41=78kPa

Ο συντελεστής πλευρικής ώθησης ηρεμίας είναι : K'_o=1-sinφ΄=1-sin33^o=0.455

Η ενεργή οριζόντια ώθηση στον άξονα είναι σ_{ha}΄=0.455·78=35.5kPa

Η ολική οριζόντια τάση στον άξονα είναι : σ_{ha}=35.5+41=76.5kPa

Ασκούμενη πίεση πολφού στο μέτωπο

Προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι μετακινήσεις στο μέτωπο, η πίεση q_{Fs} του πολφού στο μέτωπο θα πρέπει να είναι ίση με την ολική οριζόντια τάση ή και λίγο μεγαλύτερη, π.χ. q_{Fs}=100 kPa. Επομένως η συνολική δύναμη Q_{Fs} που ασκεί ο πολφός στο μέτωπο είναι Q_{Fs}=100·2.12^2·π/4=350kN.

Ασκούμενη δύναμη αντίστασης περιοχής μετώπου

Στο μέτωπο, εκτός της πίεσης του πολφού, ασκείται αντίσταση Q_{Fe} στο κοπτικό άκρο της ασπίδας και τριβής Q_{Ff} στην ασπίδα και στους πρώτους σωλήνες, μέχρις ότου η λίπανση του πολφού ενεργοποιηθεί πλήρως στις επόμενες σωλήνες. Γίνεται η θεώρηση ότι το μήκος αυτό εκτείνεται στα L_{a1}=4m της ασπίδας συν το μήκος των δύο πρώτων σωλήνων L_{a2}=5m. Η εκτίμηση της αντίστασης τριβής βασίζεται στον υπολογισμό της συμπίεσης που ασκεί το έδαφος στο πρόσθιο τμήμα της ασπίδας και τους δύο πρώτους σωλήνες. Ο υπολογισμός γίνεται σύμφωνα με το προσομοίωμα που δίνεται στο Σχήμα 1 (Auld, 1982; Terzaghi, 1943). Το πλάτος Β υπολογίζεται από την:

$$B=\frac{D_e}{2}\cdot\left[\tan\left(45^o-\frac{\phi'}{2}\right)+\frac{1}{\sin\left(45^o+\frac{\phi'}{2}\right)}\right]=$$

$$\frac{2.12}{2}\cdot\left[\tan\left(45^o-\frac{33^o}{2}\right)+\frac{1}{\sin\left(45^o+\frac{33^o}{2}\right)}\right]==\frac{2.12}{2}\cdot\left[0.543+1.138\right]=1.78m$$

(9-19)

Το βάθος είναι:
$H=z_a-D_p/2=6.1-2.12/2=5m$
Ως το βάθος $H_1=2m$ το έδαφος είναι πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα. Επομένως, το φαινόμενο βάρος είναι $\gamma=\gamma_s=19.5kN/m^3$, και η κατακόρυφη τάση δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_{vT}(z=H_1)=\frac{\gamma\cdot B}{K\cdot\tan\phi'}\cdot\left[1-\exp\left(-K\cdot\tan\phi'\cdot\frac{H_1}{B}\right)\right]=\frac{\gamma}{A_1}\cdot\left[1-\exp\left(-A_1\cdot H_1\right)\right]$$

(9-20)

$$K=\frac{1-\sin\phi'}{1+\sin\phi'}=0.295$$

(9-21)

$$A_1=\frac{K\cdot\tan\phi'}{B}=\frac{0.295\cdot\tan33^o}{1.78}=\frac{0.1076}{m}$$

(9-22)

$$\sigma_{vT}(z=H_1=2m)=\sigma'_{vT}(z=2m)=\frac{19.5}{0.1076}\cdot\left[1-\exp\left(-0.1076\cdot2\right)\right]=35.1kPa$$

Κάτω από το βάθος $z=H_1=2m$, το έδαφος είναι κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα. Επομένως το υπό άνωση φαινόμενο βάρος είναι $\gamma_b=9.5kN/m^3$, και η κατακόρυφη τάση υπολογίζεται από τις σχέσεις:

$$A_2=K\cdot\tan\phi'\frac{H-H_1}{B}=0.295\cdot\tan33^o\cdot\frac{5-2}{1.78}=0.323$$

(9-23)

$$\sigma'_{vT}\left(z>H_1=2m\right)=\sigma'_{vT}(z=H_1=2m)\cdot\exp\left(-A_2\right)+\frac{\gamma_b}{A_1}\cdot\left[1-\exp\left(-A_2\right)\right]=$$

$$=35.1\cdot\exp\left(-0.323\right)+\frac{9.5}{0.1076}\cdot\left[1-\exp\left(-0.323\right)\right]=25.4+24.4=49.8kPa$$

(9-24)

Η οριζόντια συνιστώσα της ενεργής τάσης δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma'_{hT}=K\cdot\left(\sigma'_{vT}+0.5\cdot\gamma'\cdot D_e\right)=0.295\cdot\left(49.8+0.5\cdot9.5\cdot2.12\right)=17.7kPa$$ Εξίσωση 1

Η αντίσταση της τριβής q_{Ff} υπολογίζεται από τη σχέση:

$$q_{Ff}=\frac{\pi\cdot D_e}{2}\cdot\left(\sigma'_{vT}+\sigma'_{hT}\right)\cdot\tan\delta=\frac{\pi\cdot2.12}{2}\cdot\left(49.8+17.7\right)\cdot\tan\left(0.87\cdot33^o\right)=123kN/m$$

(9-25)

Για αντίσταση σε μήκος $L_a=L_{a1}+L_{a2}=9m$, η αντίσταση τριβής ισούται με:

$$Q_{Ff}= L_a \cdot q_{Ff}=9 \cdot 123=1107kN \quad (9\text{-}26)$$

Η αντίσταση του κοπτικού άκρου της ασπίδας εκτιμάται σε $Q_{Fe}=200kN$. Η συνολική αντίσταση Q_F του εμπρόσθιου τμήματος της διάνοιξης είναι το σύνολο των δυνάμεων λόγω της αντίστασης Q_{Fs} του πολφού, της αντίστασης Q_{Fe} του περιφερειακού κοπτικού άκρου της ασπίδας και της αντίστασης Q_{Ff} τριβής. Επομένως,

$$Q_F=Q_{Fs}+Q_{Fe}+Q_{Ff}=350+200+1107\approx 1650kN \quad (9\text{-}27)$$

Ευστάθεια της διάτρησης

Η ευστάθεια της διάτρησης υπολογίζεται σύμφωνα με τη θεωρία των Atkinson and Mair (1981). Η αναγκαία πίεση σ_T , που απαιτείται να ασκηθεί, για μη συνεκτικά εδάφη εξαρτάται από το συντελεστή ευστάθειας T_γ που δίνεται από το διάγραμμα στο Σχήμα 2. Από το διάγραμμα, $T_\gamma=0.3$, και η απαιτούμενη πίεση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\sigma_T = \gamma_b \cdot D_p \cdot T_\gamma + u_a = 9.5 \cdot 2.12 \cdot 0.3 + 41 = 47 \approx 50kPa \quad (9\text{-}28)$$

Ελαστική σύγκλιση του υπεδάφους

Η ελαστική σύγκλιση των τοιχωμάτων της σήραγγας εξαρτάται από τις ενεργές τάσεις στο βάθος διάνοιξης και από την εσωτερική πίεση αντίστασης του πολφού. Οι βραχύνσεις της κατακόρυφης (δ_v) και της οριζόντιας (δ_h) διαμέτρου της σήραγγας λόγω του εντατικού πεδίου, και η αντισταθμίζουσα ακτινική μήκυνση (δ_p) της σήραγγας λόγω της ασκούμενης εσωτερικής πίεσης p_i , υπολογίζονται από τις σχέσεις (Kirsch, 1898):

$$\delta_v = \frac{1-\nu_s'^2}{E_s'} \cdot D_e \cdot \left(3 \cdot \sigma_{va}' + \sigma_{ha}'\right)$$

$$\delta_h = \frac{1-\nu_s'^2}{E_s'} \cdot D_e \cdot \left(3 \cdot \sigma_{ha}' + \sigma_{va}'\right)$$

$$\delta_p = \frac{1+\nu_s'}{2 \cdot E_s'} \cdot p_i \cdot D_e \quad (9\text{-}29)$$

Αντικαθιστώντας στις δύο πρώτες σχέσεις τις προηγουμένως υπολογισθείσες τιμές της κατακόρυφης και οριζόντιας συνιστώσας της ενεργής τάσης, $\sigma'_{va}=78kPa$, $\sigma'_{ha}=35.5kPa$, και τις παραμέτρους παραμορφωσιμότητας $E's=100MPa$, $\nu_s'=0.2$, υπολογίζονται:

$$\delta_v = \frac{1-0.2^2}{100} \cdot 2120 \cdot \left(3 \cdot 78 + 35.5\right) = 5.5mm$$

$$\delta_h = \frac{1-0.2^2}{100} \cdot 2120 \cdot \left(3 \cdot 35.5 + 78\right) = 3.8mm \quad (9\text{-}30)$$

Στις παραπάνω μετακινήσεις θα πρέπει να αφαιρεθεί το διπλάσιο της ακτινικής μήκυνσης λόγω της εσωτερικής πίεσης που οφείλεται στη διαφορά της ασκούμενης πίεσης από τον πολφό μείον την πίεση του νερού, ήτοι $p_i=p_s-u_a=50-41\approx 10kPa$.

$$2 \cdot \delta_p = 2 \cdot \frac{1+0.2}{2 \cdot 100} \cdot 0.010 \cdot 2120 = 0.25mm$$

Η παραπάνω μήκυνση της διαμέτρου είναι αμελητέα. Εφόσον διατηρείται σταθερά ή πίεση του πολφού, μία υπερεκσκαφή 20 mm κατά τη διάμετρο θα επαρκεί για τη διατήρηση ενός δακτυλίου από λιπαντικό γύρω από τη σωλήνωση.

Καθίζηση του εδάφους

Εφόσον διατηρείται η πίεση του μετώπου, η καθίζηση λόγω παραμόρφωσης του μετώπου θα είναι αμελητέα. Υπάρχει επίσης η πιθανότητα ανύψωσης της επιφάνειας του εδάφους στην περίπτωση υπερπίεσης του μετώπου. Για μακροχρόνιο πλήρες κλείσιμο του δακτυλίου της υπερεκσκαφής, η απώλεια όγκου V_s, που θα πρέπει να συμπληρωθεί από το περιβάλλον έδαφος, για υπερεκσκαφή ΔD_p=40mm ως προς τη διάμετρο, είναι:

$$V_s=[(D_p+\Delta D_p)^2-D_p^2)\cdot\pi/4=(2.14^2-2.12^2)\cdot\pi/4 =0.0669\ m^3/m \quad (9\text{-}31)$$

Το μήκος i της απόστασης του σημείου καμπής υπολογίζεται (O' Reilly & New, 1982) για μη συνεκτικό έδαφος από τη σχέση:

$$i=0.28\cdot z_a-0.12=0.28\cdot 6.1-0.12=1.59m \quad (9\text{-}32)$$

Για κανονική κατανομή της καθίζησης (βλέπε σχήμα 5 της άσκησης 4), η μέγιστη τιμή υπολογίζεται :

$$S_{\max}=\frac{V_s}{i\cdot\sqrt{2\pi}}=\frac{0.0669}{1.59\cdot\sqrt{2\cdot\pi}}=16.8mm \quad (9\text{-}33)$$

Η έκταση της καθίζησης υπολογίζεται ίση με :

$$6\cdot i=6\cdot 1.59\approx 9.5m \quad (9\text{-}34)$$

Η μέγιστη κλίση, συμβαίνει στο σημείο καμπής της κατανομής.

$$\frac{dS(y=i)}{dy}=0.606\cdot\frac{S_{\max}}{i}=0.606\cdot\frac{16.8}{1.59\cdot 10^3}=\frac{1}{95} \quad (9\text{-}35)$$

Τριβή των σωλήνων

Για πλήρη περιμετρική λίπανση της σωλήνωσης, οι σωλήνες βρίσκονται υπό άνωση. Η δύναμη της άνωσης q_b, το βάρος της σωλήνωσης w_p, και η συνισταμένη κατακόρυφη δύναμη q_v, υπολογίζονται από τις σχέσεις :

$$q_b=D_p^2\cdot\gamma_w\cdot\pi/4=2.12^2\cdot 10\cdot\pi/4=35.3kN/m$$
$$w_p=(D_p^2-d^2)\cdot\gamma_c\cdot\pi/4=(2.12^2-1.80^2)\cdot 24\cdot\pi/4=23.6kN/m$$
$$q_v=q_b-w_p=35.3-23.6=11.7kN/m \quad (9\text{-}36)$$

Επομένως η δύναμη τριβής q_{fb} λόγω της επαφής με τα τοιχώματα του εδάφους, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$q_{fb}=q_v\cdot\tan\delta=11.7\cdot\tan(0.87\cdot 33^o)=6.4kN/m \quad (9\text{-}37)$$

Η συνολική τριβή είναι το άθροισμα της αντίστασης τριβής q_{fb} μεταξύ σωλήνας-εδάφους, της αντίστασης τριβής q_{fs} του μίγματος λιπαντικού-εδάφους στο δακτύλιο υπερεκσκαφής, και της αντίστασης q_{fm} τυχόν αποκλίσεων από την ευθυγραμμία. Η αντίσταση q_{fs} του λιπαντικού/εδάφους εκτιμάται σε 0.5kN/m^2, ήτοι :

$$q_{fs}=0.5\cdot D_p\cdot\pi=3.3kN/m \quad (9\text{-}38)$$

Η απόκλιση από την ευθυγραμμία εκτιμάται ότι προκαλεί πρόσθετη αντίσταση q_{fm} που επαυξάνει την αντίσταση τριβής κατά 20%. Άρα, η συνολική αντίσταση τριβής q_f υπολογίζεται:

$q_f=q_{fb}+q_{fs}+q_{fm}=(6.4+3.3)\cdot 1.2=11.6kN/m$

(9-39)

Φόρτιση των αρμών

Επιλέγεται παρέμβυσμα από MDF πάχους 18mm και πλάτους 120mm. Με θεώρηση συνήθων κριτηρίων σχεδιασμού δίνεται από τον κατασκευαστή η μέγιστη ώθηση που δύναται να αναλάβει ο κάθε σωλήνας σα συνάρτηση της γωνιακής απόκλισης (Για απόκλιση 0.5°, σύμφωνα με το διάγραμμα (Σχήμα 4) του κατασκευαστή η μέγιστη ώθηση που δύναται να αναλάβει ο σωλήνας είναι Q_{JP}=4400kN (450t). Επομένως η απόσταση του μετώπου ως τον πρώτο ενδιάμεσο σταθμό προώθησης θα πρέπει να είναι μικρότερη από:

$L_{1J}=[Q_{JP}-Q_F]/q_f+L_a=(4400-1650)/11.4+9=250m$

(9-40)

Η αντίσταση τριβής του υπολοιπόμενου μήκους υπολογίζεται ότι είναι:
$Q_{f2}=q_f\cdot(L-L_{1J}+L_{a1})=11.4\cdot(300-250+4)=600kN$

(9-41)

Καθόσον απαιτείται μόνον ένας ενδιάμεσος σταθμός προώθησης, είναι προτιμότερο να τοποθετηθεί πλησιέστερα στο μέτωπο. Επιλέγεται τοποθέτησή του ενδιάμεσου σταθμού στα L_{1J}=100m από το μέτωπο. Στην περίπτωση αυτή το φορτίο ώθησης Q_{J1} του ενδιάμεσου σταθμού υπολογίζεται ότι θα είναι:

$Q_{J1}=Q_F+(L_{1J}-L_a)\cdot q_f=1626+(100-9)\cdot 11.4=2709kN$

(9-42)

και η δύναμη ώθησης Q_{J0} του κύριου σταθμού (στο φρέαρ) ώθησης υπολογίζεται ότι θα είναι:

$Q_{J0}=(L-L_{1J}+L_{a1})\cdot q_f=204\cdot 11.4=2300kN$

(9-43)

Η επιλογή αυτή επιτρέπει ένα περιθώριο ασφαλείας έναντι σφάλματος, στην περίπτωση που η λίπανση είναι ατελής ή η γωνία απόκλισης από την ευθυγραμμία είναι μεγαλύτερη.

Μέγιστη ασκούμενη δύναμη στο τοιχίο ώθησης

Το τοιχίο ώθησης στο φρέαρ θα πρέπει να δύναται να αναλάβει το μέγιστο φορτίο ώθησης του σωλήνα πολλαπλασιασμένο με ένα συντελεστή ασφάλειας. Για ένα συντελεστή ασφαλείας FS_w=1.5, το τοιχίο ώθησης θα πρέπει να σχεδιασθεί ώστε να παραλαμβάνει φορτίο :
$Q_w=FS_w\cdot Q_{JP}=1.5\cdot 4400=6600kN$

(9-44)

Σύνοψη της επιλεγμένης λύσης

Πίεση στο μέτωπο: Πίεση 100kPa που δημιουργεί ώθηση στο μέτωπο 350kN.

Φορτίο στο μέτωπο της σήραγγας: Η τριβή στην ασπίδα (4m) και τις δύο πρώτες σωλήνες (5m), όπου η λίπανση δεν είναι πλήρως ενεργή, ισούται με 1100kN. Η αντίσταση του κοπτικού άκρου της ασπίδας εκτιμάται σε 200kN. Το συνολικό φορτίο στο μέτωπο είναι 1100+350+200=1650kN.

Ευστάθεια της διάτρησης: Χρήση πολφού υπό πίεση 50kPa.

Σύγκλιση του περιβάλλοντος υπεδάφους: Για συνεχή εφαρμογή της πίεσης του πολφού, μία υπερεκσκαφή 20mm κρίνεται επαρκής.

Καθίζηση του εδάφους: Εφόσον διατηρείται η πίεση του πολφού στο μέτωπο, η καθίζηση λόγω υποχώρησης του μετώπου θα είναι αμελητέα. Η μακροχρόνια καθίζηση λόγω σύγκλισης των τοιχωμάτων στο κενό της υπερεκσκαφής υπολογίζεται ότι θα έχει μέγιστη τιμή 16.8mm και θα εκτείνεται σε πλάτος 9.5m.

Τριβή της σωλήνωσης: Η συνολική τριβή της σωλήνωσης, επιτρέποντας μία επαύξηση 20% για απόκλιση από την ευθυγραμμία, υπολογίζεται σε 1140kN/m.

Φόρτιση των αρμών της σωλήνωσης: Με χρήση παρεμβυσμάτων πλάτους 120mm, και μέγιστη επιτρεπόμενη γωνιακή απόκλιση των αρμών από την ευθυγραμμία 0.5°, το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο στους σωλήνες είναι 4400kN. Για την εκτιμώμενη τιμή της τριβής της σωλήνωσης, μόνο ένας ενδιάμεσος σταθμός ώθησης απαιτείται. Προτείνεται η τοποθέτησή του μετά τα πρώτα 100m. Τούτο θα έχει σα συνέπεια μία φόρτιση του

ενδιάμεσου γρύλου με 2700kN, και μία τελική φόρτιση του κυρίου γρύλου 2300kN. Κάνοντας χρήση ενός συντελεστή ασφαλείας 1.5, προτείνεται το τοίχωμα ώθησης να σχεδιασθεί ώστε να παραλαμβάνει φορτίο 6600kN.

Παρακολούθηση και καταγραφή: Κατά τη διάνοιξη θα πρέπει να καταγράφονται τα γεωμετρικά στοιχεία της διάνοιξης, τα φορτία ώθησης, και τα γεωλογικά στοιχεία, τα οποία θα πρέπει να παρουσιάζονται σε κατάλληλα διαγράμματα παρακολούθησης. Στα γεωμετρικά στοιχεία συμπεριλαμβάνονται ο αριθμός του τελευταίου εισερχόμενου σωλήνα, η θέση του μετώπου, και η οριζόντια και κατακόρυφη απόκλιση στο πρόσθιο και οπίσθιο άκρο της ασπίδας. Στα φορτία ώθησης συμπεριλαμβάνονται τα εφαρμοζόμενα, στον κύριο και τον ενδιάμεσο σταθμό, καθώς και η εφαρμογή και το είδος λίπανσης. Στα γεωτεχνικά στοιχεία συμπεριλαμβάνονται οι εδαφικές συνθήκες, και η ύπαρξη ή εισροή νερού. Εκτός από τα παραπάνω, λόγω της εκμηχανισμένης διάνοιξης θα πρέπει να καταγράφονται στοιχεία συμπεριφοράς του πολφού, της ασπίδας και του συστήματος κοπής.

Αναγνώριση: Ακολουθήθηκε η μεθοδολογία που προτείνεται μέσω παραδειγμάτων από την P.J.A (1995a).

Κεφάλαιο 10

Σύνοψη
Τα φρέατα είναι υπόγειες κατακόρυφες ή παρακατακόρυφες διανοίξεις. Διακρίνονται σε αβαθή, που είναι γενικά τα αστικά, και σε βαθιά, που είναι τα εκτός αστικού ιστού μεταλλευτικά, καθώς και φρέατα πάνω από σήραγγες, υδροηλεκτρικούς σταθμούς, κλπ. Αναπτύσσονται οι μέθοδοι διάνοιξής τους. Η εμπέδωση επιτυγχάνεται με λυμένα παραδείγματα και ασκήσεις.

Προαπαιτούμενη γνώση
Μαθήματα: Εξόρυξη πετρωμάτων, Υποστήριξη υπογείων έργων, Μηχανική πετρωμάτων. Χρήσιμη βιβλιογραφία: Bickel et al. (1996).

10. Φρέατα

Η πρόσβαση σε σήραγγα επιτυγχάνεται είτε από μία πύλη (portal-στόμιο) που παρέχει οριζόντια επικοινωνία με την επίγεια επιφάνεια είτε μέσω ενός φρέατος που παρέχει κατακόρυφη επικοινωνία με το επίπεδο της σήραγγας. Σκοπός των φρεάτων είναι η πρόσβαση ανθρώπων, ο αερισμός, η μεταφορά νερού, κ.λπ. από την ανώτερη στάθμη πάνω ή μέσα στη γη, στην κατώτερη στάθμη κάτω από την πρώτη, ή/και αντίστροφα. Τα φρέατα διαφέρουν από τις στοές κατά το ότι διατάσσονται κατακόρυφα· η τεχνική της όρυξης συμπίπτει με αυτή των στοών, πλην όμως η εκτέλεση της εργασίας καθίσταται δυσκολότερη και πιο επικίνδυνη. Στα συνήθη προβλήματα προστίθενται ειδικά, όπως η αντιμετώπιση των νερών και η ασφάλεια του προσωπικού (Μούσουλος, 1960). Τα φρέατα διακρίνονται σε αβαθή-αστικά και βαθιά εκτός του αστικού ιστού. Ο σκοπός τους, η γεωμάζα εντός της οποίας διανοίγονται, και τρόπος κατασκευής αβαθών-αστικών και βαθιών-εξωαστικών, είναι διαφορετικός.

10.1 Αβαθή αστικά φρέατα

Στις πόλεις, που ο ελεύθερος χώρος είναι περιορισμένος και πολύτιμος, η πρόσβαση στους υπόγειους χώρους και ειδικότερα στις σήραγγες, πραγματοποιείται κατακόρυφα, μέσω φρεάτων. Αυτή η πρόσβαση έχει γενικά μικρό βάθος και χρησιμοποιείται για προσωρινή ή μόνιμη λειτουργία. Η προσωρινή εξυπηρετεί τη σήραγγα προσφέροντας πρόσβαση για διακίνηση υλικών και προσωπικού. Η μόνιμη αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα του δομήματος υπογείου έργου, δύναται όμως να εξυπηρετεί τις ανάγκες πρόσβασης κατά την κατασκευή του. Τα μόνιμα φρέατα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αερισμό, άντληση, δίκτυα κοινής ωφελείας, είσοδο/έξοδο ανθρώπων, ή μπορεί να διευρυνθούν για να στεγάσουν σταθμούς. Τα προσωρινού χαρακτήρα φρέατα επιχώνονται συνήθως μετά το τέλος της κατασκευής.

Η χωροθέτηση των φρεάτων επιδρά σημαντικά στην επίδοση της κατασκευαστικής διαδικασίας του έργου που εξυπηρετούν. Για παράδειγμα, η τοποθέτηση του φρέατος στο μέσο μιας σήραγγας επιτρέπει τη διάνοιξή της προς δύο κατευθύνσεις. Τούτο επιτρέπει την εξυπηρέτηση και των δύο μετώπων από ενιαίες μονάδες πιεσμένου αέρα, ανέλκυσης/καθέλκυσης, μηχανουργείου, γραφείων. Η ύπαρξη ελεύθερου χώρου πέριξ του φρέατος, επιτρέπει την εγκατάσταση κτισμάτων και γραφείων, καθώς και την προσωρινή απόθεση των μπαζών.

Μετά τη διάνοιξη του φρέατος στο επιθυμητό βάθος, εφόσον απαιτείται, εκσκάπτεται θάλαμος αντλιοστασίου και λεκάνη υδάτων. Η αντλία πρέπει να έχει επαρκή ικανότητα χειρισμού της μέγιστης αναμενόμενης εισροής. Πληροφορίες σχετικά με την ποσότητα των υδάτων που θα εισρεύσουν στο φρέαρ λαμβάνονται κατά τη διάρκεια της διάνοιξης του φρέατος, και δύνανται να προεκτιμώνται από γεωτρήσεις ή βάση της προηγούμενης εμπειρίας στην ίδια γεωμάζα. Απροσδόκητα μεγάλες εισροές μπορεί να προκύψουν εφόσον, κατά τη διάρκεια της εκσκαφής, απαντηθούν υδροφόρα στρώματα.

10.1.1 Εκσκαφή

10.1.1.1 Εδάφη

Τα φρέατα σε μαλακό έδαφος δύνανται να εκσκάπτονται από γερανό, εξοπλισμένο με σκαπτικό κάδο τύπου αχιβάδας (clamshell-αρπάγη) για την ανέλκυση των μπαζών από το φρέαρ και την απόρριψή τους σε χώρο προσωρινής απόθεσης ή απευθείας σε ένα φορτηγό στην επίγεια επιφάνεια. Επίσης, είναι δυνατή η εκσκαφή του φρέατος από κλασικό εκσκαφέα, ο οποίος καταβιβάζεται εντός του φρέατος (Σχήμα 10-1α) με τη βοήθεια γερανού.

Τα προσωρινά φρέατα σε μαλακό έδαφος, εφόσον ο χώρος το επιτρέπει, είναι συνήθως κυκλικά. Γύρω από το στόμιο του φρέατος πρέπει να κατασκευάζεται ένα κολάρο-δακτύλιος, από σκυρόδεμα, πλάτους ~60 cm και ύψους ~120 cm, με την άνω επιφάνεια του κολάρου να εξέχει τουλάχιστον 30 cm πάνω από το επίπεδο του εδάφους. Το κολάρο μαζί με την άμεση επένδυση του φρέατος συγκρατεί την ευάλωτη περιοχή του στομίου και εμποδίζει την πτώση επιφανειακού νερού και μπαζών στο άνοιγμα. Πάνω από το κολάρο πρέπει να τοποθετούνται, χειρολισθήρες ή άλλη ασφαλής προστασία. Η άμεση επένδυση του φρέατος εγκαθίσταται συνήθως ανά 1.50 m, μολονότι φρέατα έχουν βυθιστεί για πάνω από 9 m χωρίς στήριξη. Ο ρυθμός εγκατάστασης εξαρτάται από το είδος της επένδυσης και τη φύση του εδάφους.



(α) Τσάπα στο βάθος του φρέατος Μετρό Γεωπονικής



(β) Δακτύλιος ακαμψίας πολυγωνικού φρέατος

Σχήμα 10-1. Εκσκαφή φρεάτων

Ένα μόνιμο φρέαρ επενδύεται τελικά με σκυρόδεμα. Τα μόνιμα φρέατα δύνανται να έχουν διατομή κυκλική, οβάλ (NATM), ή ορθογωνική. Το σκυρόδεμα της επένδυσής τους μπορεί να εγχέεται είτε μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μεταλλοτύπων είτε μεταξύ εσωτερικών μεταλλοτύπων και της εξωτερικής άμεσης αντιστήριξης.

Η βύθιση φρεάτων σε μαλακό έδαφος μπορεί να βλάψει γειτονικά κτίσματα, δίκτυα κοινής ωφελείας, αγωγούς, ή οδούς. Το πρόβλημα είναι ιδιαίτερα οξύ σε μαλακά εδάφη, όπου, η μείωση του φορτίου πάνω από την περιοχή εκσκαφής, δύναται να προκαλέσει διαρροή του εδάφους και καθίζηση στην επιφάνεια. Για την αποτροπή της πλαστικής διαρροής απαιτείται ένα σωστά σχεδιασμένο σύστημα αντιστήριξης του φρέατος. Τα χαρακτηριστικά του εδαφικού σχηματισμού, το βάθος του φρέατος, η διάμετρος, και οικονομικοί παράγοντες καθορίζουν την επιλογή μεταξύ εναλλακτικών μεθόδων επένδυσης και αντιστήριξης.

10.1.1.2 Βράχος

Η εκσκαφή φρεάτων σε βράχο πραγματοποιείται συνήθως με τη μέθοδο «διάτρηση – ανατίναξη». Οι εκσκαφές φρεάτων για αστικές σήραγγες είναι συνήθως μικρότερου βάθους από 35m, και γι' αυτό η χρήση πιο εξελιγμένου εξοπλισμού εκσκαφής δεν είναι συχνά οικονομικά συμφέρουσα. Όταν βυθίζονται φρέατα πιο βαθιά από 35m, χρησιμοποιούνται συνήθως μεταλλευτικές μέθοδοι. Πριν από την έναρξη της εκσκαφής, αν η διείσδυση των υπόγειων υδάτων από τα υπερκείμενα δημιουργεί προβλήματα, μπορεί να είναι σκόπιμη η ένεση και σφράγιση των υπερκείμενων. Εάν αναμένεται διείσδυση του νερού, κατά την εκσκαφή πτωχής ποιότητας πετρωμάτων, δύναται να κατασκευαστεί κουρτίνα ενέσεων για τη δημιουργία φράγματος του νερού. Προς τούτο, πριν από την εκσκαφή του φρέατος ανορύσσονται γεωτρήσεις σε δακτύλιο σε απόσταση 3m γύρω από το φρέαρ και σε βάθος κάτω από τον πυθμένα του φρέατος, και στη συνέχεια εισπιέζεται ένεμα μέχρις άρνησης.

Το μέγεθος και το βάθος του φρέατος και το είδος του πετρώματος είναι οι καθοριστικοί παράγοντες για την επιλογή του εξοπλισμού διάτρησης. Οι διατρήσεις μπορεί να πραγματοποιηθούν, από χειροκίνητες αερόσφυρες, πτυσσόμενα διατρητικά φορεία πολλαπλών αεροσφυρών (shaft jumbos), κ.α.. Τα φορεία τοποθετούνται και χωροσταθμούνται στο μέτωπο της εκσκαφής, οι εύκαμπτοι σωλήνες συνδέονται, και αρχίζει η διάτρηση. Συνήθως, μόνο τα μεγαλύτερα και βαθύτερα φρέατα μπορεί να δικαιολογήσουν τη χρήση ενός τέτοιου φορείου.

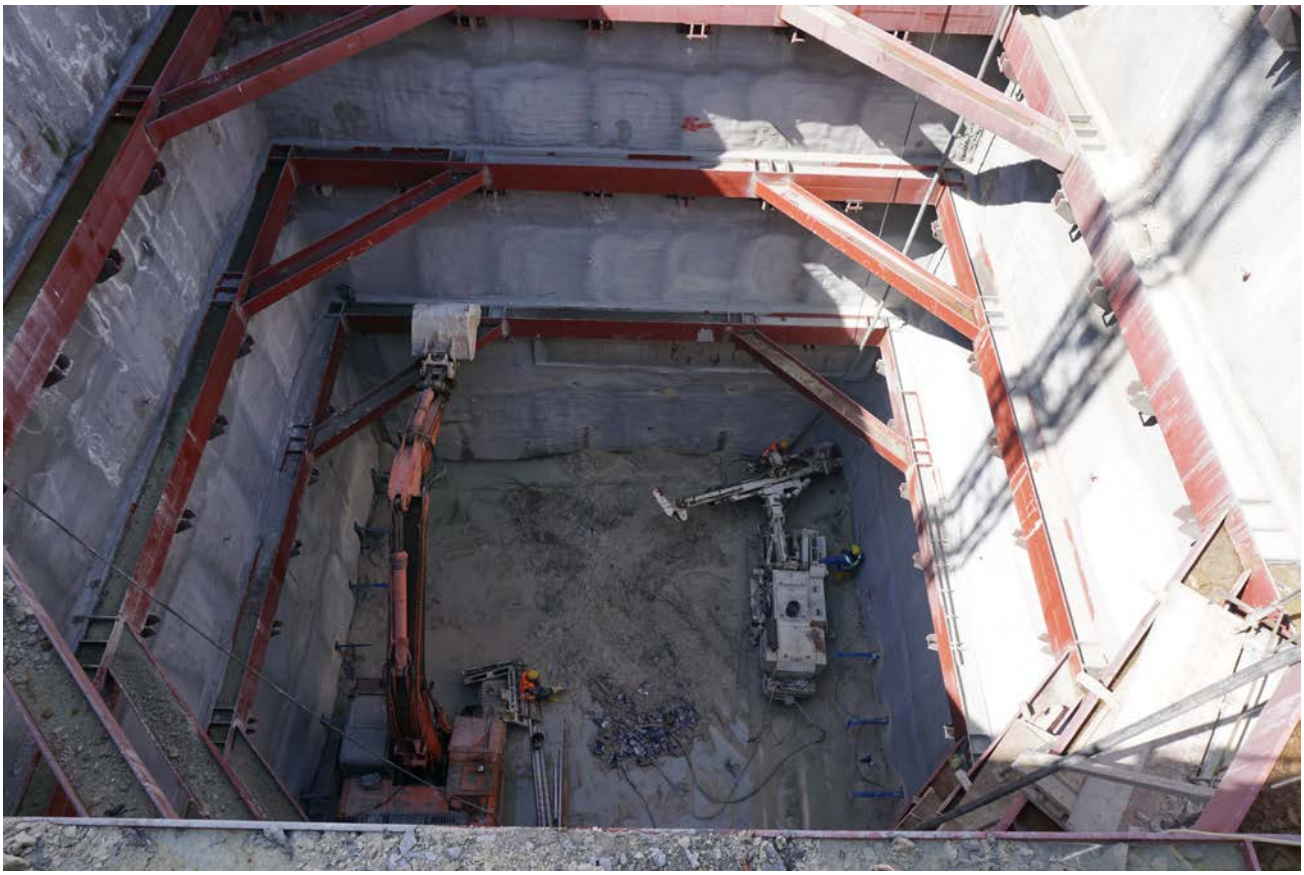
Ο προσδιορισμός του βήματος προχώρησης προσδιορίζεται με βάση την ευκολία της διάτρησης και την ελαχιστοποίηση της υπερεκσκαφής. Ειδικές ρυθμίσεις πρέπει να γίνουν για τη δημιουργία λεκάνης αποστράγγισης, αν υπάρχει πρόβλημα νερού. Η πλέον κατάλληλη διάταξη ανατινάξεων για κυκλικά φρέατα, είναι η προεκσκαφή πυραμίδας. Η προεκσκαφή αυτή αποτελείται από διατρήματα υπό γωνία που συναντώνται σε μια κοινή κορυφή στον άξονα του φρέατος. Στην περιφέρεια ανορύσσονται παράλληλα διατρήματα. Στα ορθογώνια φρέατα χρησιμοποιείται προεκσκαφή V. Οι προεκσκαφές πυραμίδας και V είναι μόνο δύο παραδείγματα των διατάξεων ανατίναξης που χρησιμοποιούνται. Υπάρχουν και πολλές άλλες διατάξεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκσκαφή των φρεάτων.

Μετά την ανατίναξη, το ξεμπάζωμα πραγματοποιείται συνήθως από γερανούς με αρπάγη. Χειρωνακτική αποκομιδή πραγματοποιείται σε φρέατα διαμέτρου μέχρι 3m. Όταν το φρέαρ έχει βάθος μικρότερο από 20m, τα μπάζα μπορεί να ανελκύονται σε κάδους που ανυψώνονται από γερανό.

Σε ιζηματογενή, κερματισμένα, ή τεμαχισμένα πετρώματα, τα τοιχώματα μπορεί να είναι αρκετά επικίνδυνα. Εφόσον απαιτείται στήριξη, αυτή θα πρέπει να τοποθετείται γρήγορα μετά την εκσκαφή. Η στήριξη μπορεί να αποτελείται από χαλύβδινα πλαίσια και πλάκες επένδυσης, χαλύβδινα πλαίσια και ξύλινη επικάλυψη, ήλους με ή χωρίς δομικό πλέγμα ή εκτοξευμένο σκυρόδεμα. Γενικά, όλα τα μέτρα υποστήριξης που περιγράφονται για τη στήριξη φρεάτων σε εδάφη μπορεί να χρησιμοποιηθούν, ίσως με κάποιες τροποποιήσεις, στα φρέατα σε βράχο. Το σύστημα στήριξης τύπου ΝΑΤΜ που περιγράφεται παρακάτω είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για φρέατα σε βράχο που απαιτούν προσωρινή στήριξη. Καλή πρακτική, ειδικότερα, είναι η εκτόξευση σκυροδέματος στις παρειές του φρέατος, που δύναται να λειτουργεί και ως μόνιμη στήριξη. Πριν από την τοποθέτηση του συστήματος στήριξης, τα χαλαρά πετρώματα πρέπει να ξεσκαρώνονται. Αν το πέτρωμα είναι σχετικά καλής ποιότητας, μπορεί να είναι προτιμότερη απλώς η ήλωσή του και η στερέωση πλέγματος στους ήλους, ώστε να συγκρατούνται αποφλοιώσεις του πετρώματος των τοιχωμάτων.

10.1.2 Προαντιστήριξη εδαφών

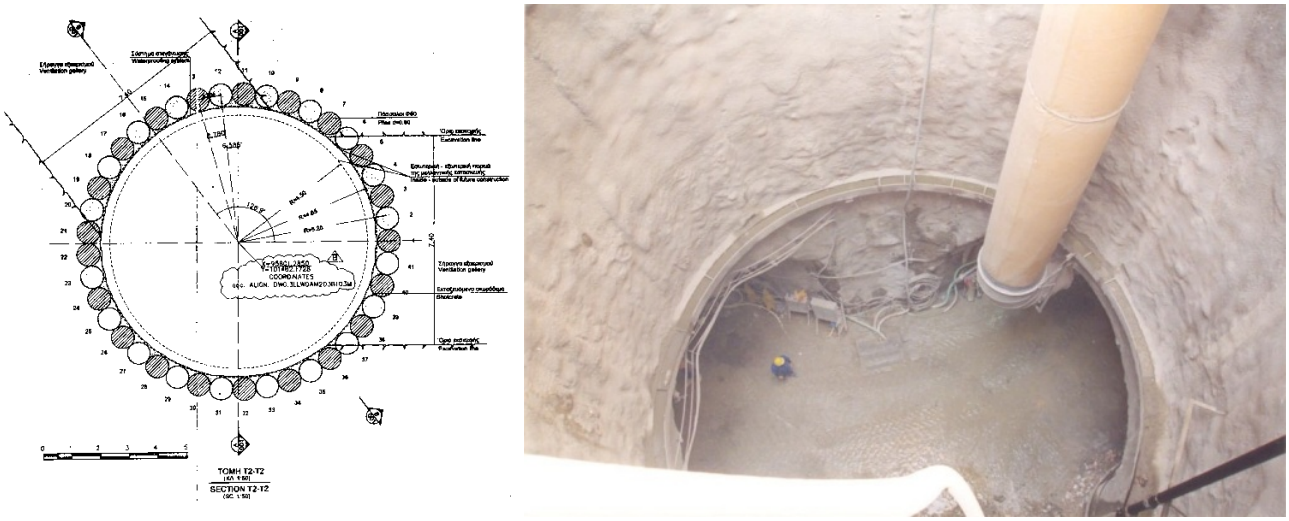
Όταν η γεωμάζα πέριξ του φρέατος δεν είναι ευσταθής, τότε απαιτείται αντιστήριξή της πριν από την εκσκαφή. Αυτή επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση φορέων αντιστήριξης εντός του εδάφους, όπως πασσάλων ή τοίχων, καθώς και επιπέδων δυσκαμψίας τους, των οποίων οι δοκοί αναλαμβάνουν τα φορτία σε θλίψη στα κυκλικά φρέατα ή σε κάμψη στα ορθογωνικά (Σχήμα 10-2).



Σχήμα 10-2. Τοιχία και επίπεδα δυσκαμψίας του φρέατος του Αττικό Μετρό στο Δημοτικό Θέατρο στον Πειραιά.

10.1.2.1 Φρεατοπάσσαλοι

Η συνηθέστερη μέθοδος αντιστήριξης αβαθών φρεάτων είναι με κατακόρυφους φρεατοπασσάλους (Σχήμα 10-1β). Η διάμετρος των πασσάλων είναι ~0.80-1.00 m και το μήκος διάτρησης υπερβαίνει το τελικό δάπεδο του φρέατος κατά ~2 m. Ο συνολικός αριθμός των πασσάλων είθισται να είναι άρτιος, με τους μισούς πασσάλους οπλισμένους και τους άλλους μισούς άοπλους, τοποθετούμενους εναλλάξ. Ο οπλισμός τους είναι διαμήκης, συνήθως Ø20-Ø25, και σπειροειδής, συνήθως Ø10-Ø12. Οι πάσσαλοι συνήθως διατάσσονται σε όλη την περιφέρεια της εκσκαφής, και είναι είτε εφαπτόμενοι (Σχήμα 10-3α) είτε τεμνόμενοι. Στην κεφαλή τους συνδέονται με περιφερειακή κεφαλόδεσμο δοκό, ενώ και σε βαθύτερα επίπεδα κατασκευάζονται δακτύλιοι ακαμψίας (Σχήμα 10-1β), με δοκούς από πρότυπες χαλύβδινες διατομές ή οπλισμένο σκυρόδεμα, που συνδέονται με τους πασσάλους. Ειδικά, εφόσον από το φρέαρ διέρχονται σήραγγες, πάνω από τα στόμιά τους κατασκευάζεται δακτύλιος ακαμψίας (Σχήμα 10-3β).



(α) Διάταξη πασσάλων πέριξ φρέατος *(β) Φρέαρ. Διακρίνονται συνδετήριες στοές και δακτύλιος ακαμψίας*

Σχήμα 10-3. Φρέαρ Κνωσού του μετρό της Αθήνας (Ανδρέου, 2004).

10.1.2.2 Πασσαλοσανίδες

Οι πασσαλοσανίδες είναι σανίδες που εμπήγνυνται στο έδαφος προκειμένου να δημιουργήσουν ένα κυκλικό φορέα αντιστήριξης του εδάφους και φράγματος του νερού, εντός του οποίου πραγματοποιείται η εκσκαφή του φρέατος. Παλαιότερα κυρίως κατασκευάζονταν από ξύλο. Οι ξύλινες πασσαλοσανίδες είναι φτηνές και ο χειρισμός τους μετά την τοποθέτηση είναι εύκολος. Χρησιμοποιούνται όμως μόνον σε ρηχά φρέατα σε μαλακό έδαφος βάθους μικρότερου των 6m, καθόσον η έμπηξή τους είναι δύσκολη.



(α) Διάταξη πασσαλοσανίδων πέριξ κυκλικού φρέατος *(β) Έμπηξη πασσαλοσανίδων*

Σχήμα 10-4. Χαλύβδινες πασσαλοσανίδες

Σήμερα χρησιμοποιούνται πασσαλοσανίδες από χάλυβα (Σχήμα 10-4). Η πασσαλοσανίδα είναι ειδικής διαμόρφωσης έλασμα από χάλυβα, μήκους 6 έως 10m, η οποία εμπήγνυται στο έδαφος και ενώνεται σε αλυσιδωτή διάταξη με άλλες πασσαλοσανίδες, έτσι ώστε να σχηματιστεί τοίχος ο οποίος αντιστηρίζει το έδαφος. Το υλικό τους είναι δομικός χάλυβας S235JR ή S275JR ή S355JR, και προδιαγράφονται από τους EN 10248 και EN 10249. Συναρμοζόμενες χαλύβδινες πασσαλοσανίδες χρησιμοποιούνται συχνά για την αντιστήριξη μαλακών υδροφόρων εδαφών, εφόσον η εκσκαφή έχει βάθος από ~6 m έως ~20 m. Η έμπηξή τους πρέπει να είναι προσεκτική, ώστε η καλή συναρμογή τους να παρεμποδίζει τη διήθηση του νερού. Η εκσκαφή συνήθως ξεκινάει μετά την ολοκλήρωση της εγκατάστασης των σανίδων, εκτός αν το φρέαρ είναι ασυνήθιστα βαθύ. Στη συνέχεια, καθώς εξελίσσεται η εκσκαφή προς τα κάτω, μπορούν να εγκαθίστανται, προοδευτικά,

οριζόντιοι δακτύλιοι ακαμψίας από πρότυπες δοκούς δομικού χάλυβα ή σπανιότερα από οπλισμένο σκυρόδεμα, σε κατάλληλες κατακόρυφες αποστάσεις. Η πλευρική εδαφική πίεση και η πίεση του νερού, μεταφέρονται μέσω των σανίδων στους δακτυλίους.

10.1.2.3 Πάσσαλοι ορθοστάτες (Soldier piles)

Οι πάσσαλοι ορθοστάτες είναι δοκοί που εισάγονται στο έδαφος προκειμένου να δημιουργήσουν ένα φορέα αντιστήριξης του εδάφους, εντός του οποίου πραγματοποιείται η εκσκαφή του φρέατος. Πριν ξεκινήσει η εκσκαφή του φρέατος, εμπήγνυνται στο απαιτούμενο βάθος χαλύβδινοι πάσσαλοι, πρότυπης διατομής Η, (soldier piles), σε αποστάσεις μεταξύ τους 2 έως 3 m. Η εκσκαφή ξεκινά μετά από την εγκατάσταση όλων των πασσάλων. Με την προχώρηση της εκσκαφής, τοποθετείται στην κατακόρυφη επιφάνειά της οριζόντια ξύλινη επικάλυψη (lagging), από μαδέρια σκληρού ξύλου, πλάτους συνήθως 7.5 έως 10cm, τα οποία σφηνώνονται μεταξύ των πελμάτων των δοκών Η.

Σε υγρά εδάφη, το νερό αποστραγγίζεται συνήθως μεταξύ των σανίδων επικάλυψης. Σε πολύ υγρό έδαφος ή σε τρεχούμενη άμμο, τοποθετείται άχυρο ή κάτι αντίστοιχο μεταξύ των σανίδων επικάλυψης, για την παρεμπόδιση διαφυγής εδάφους προς την εκσκαφή. Μικρός χώρος αφήνεται μεταξύ των σανίδων ώστε να επιτρέπεται ελεγχόμενη στράγγιση. Σε βαθύτερες εκσκαφές, όπου υφίστανται μεγαλύτερες εδαφικές πιέσεις, τοποθετούνται οριζόντιες χαλύβδινες δοκοί, που δημιουργούν επίπεδα δυσκαμψίας. Αυτά μελετώνται είτε σε θλίψη του δακτυλίου τους είτε σε κάμψη, ανάλογα με το αν το φρέαρ είναι κυκλικό ή ορθογωνικό. Σε μεγάλα ορθογωνικά φρέατα, δύνανται να εγκαθίστανται χαλύβδινες αντηρίδες που να εκτείνονται μεταξύ των πλευρών. Αντιστήριξη επιτυγχάνεται επίσης με αγκύρια συγκράτησης πακτωμένα εκτός του φρέατος.

Εναλλακτικά, αντί της έμπηξης, οι πάσσαλοι δύνανται να τοποθετούνται εντός γεωτρήσεων, και στη συνέχεια να ενσωματώνονται σε σκυρόδεμα, η επικάλυψη να συνίσταται από εκτοξευμένο σκυρόδεμα οπλισμένο με δομικό πλέγμα, και η αντιστήριξη να πραγματοποιείται με αγκύρια πακτωμένα εκτός του φρέατος.

10.1.3 Αντιστήριξη με την προχώρηση

Όταν η γεωμάζα πέριξ του φρέατος είναι ευσταθής για ένα μήκος προχώρησης και χρόνο εκσκαφής, τότε η αντιστήριξή μπορεί να ακολουθεί την προχώρηση. Αυτή η αντιστήριξη επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση δακτυλίων επένδυσης μετά από κατάλληλο βήμα προχώρησης.

10.1.3.1 Πλάκες επένδυσης (Liner plates)

Οι πλάκες επένδυσης είναι ελάσματα από χάλυβα που συναρμολογούμενα μεταξύ τους δημιουργούν δακτυλίους συγκράτησης του εδάφους εκτός του φρέατος. Το βασικό πλεονέκτημα των πλακών αυτών είναι το μικρό τους μέγεθος που επιτρέπει ευκολία χειρισμών σε περιορισμένο χώρο εργασίας, χωρίς να είναι απαραίτητος ειδικός εξοπλισμός ανέλκυσης ή τοποθέτησής τους. Οι συνήθεις πλάκες επένδυσης είναι από πρεσαριστά κυματοειδή φύλλα χάλυβα με οπές κοχλίωσης στις φλάντζες που είναι διαμορφωμένες στις πλευρές και τα άκρα τους, ώστε να επιτρέπεται η σύνδεση μεταξύ τους (Σχήμα 10-5).



Σχήμα 10-5. Πλάκες επένδυσης

Η εκσκαφή του φρέατος ξεκινά με την επακριβή ανέγερση του πρώτου δακτυλίου των πλακών επένδυσης στην καθαρισμένη επίγεια επιφάνεια του εδάφους και την τοποθέτηση ενός κολάρου από σκυρόδεμα γύρω από αυτόν. Στη συνέχεια το έδαφος εκσκάπτεται μέσα στον δακτύλιο, και με το που διατίθεται νέος χώρος ένας νέος δακτύλιος από πλάκες επένδυσης κοχλιώνεται στην κάτω φλάντζα του πρώτου δακτυλίου πλακών επένδυσης. Η συναρμολόγηση των επόμενων δακτυλίων ακολουθεί την ίδια διαδικασία. Οι κατακόρυφοι αρμοί των πλακών κάθε δακτυλίου μετατίθενται από τους αμέσως ανώτερους, ώστε με την ασυνέχειά τους να αυξάνεται η αντοχή. Η ώθηση του εδάφους αναλαμβάνεται από τις πλάκες επένδυσης με συμπίεση του δακτυλίου. Σε φρέατα μεγαλύτερης διαμέτρου ή σε φρέατα όπου η πλευρική εδαφική ώθηση είναι μεγάλη, για να αυξηθεί η αντοχή της επένδυσης, μπορεί να προκαθοριστεί η τοποθέτηση στο εσωτερικό της, οριζόντιων δακτυλίων ακαμψίας με δοκούς από πρότυπες διατομές δομικού χάλυβα, σε προκαθορισμένες κατακόρυφες αποστάσεις.

10.1.3.2 Οριζόντιοι δακτύλιοι και κατακόρυφη επικάλυψη

Οι οριζόντιοι δακτύλιοι αποτελούνται από δοκούς από πρότυπες διατομές δομικού χάλυβα διαμορφωμένες εν ψυχρώ σε τόξα στην απαιτούμενη καμπυλότητα. Στα άκρα των τόξων συγκολλούνται πλάκες εφοδιασμένες με οπές για κοχλίωση των τόξων μεταξύ τους. Τα συναρμολογούμενα μεταξύ τους τόξα δημιουργούν δακτυλίους ακαμψίας για τη συγκράτηση του εδάφους εκτός του φρέατος. Η μέθοδος είναι κάπως παρόμοια με την κατασκευή των πλακών επένδυσης.. Για κάλυψη χρησιμοποιούνται συνήθως μαδέρια ξύλου μήκους 2-2.5 m (Σχήμα 10-6). Η μέθοδος απαιτεί την εκσκαφή του εδάφους σε βάθος ίσο με το μήκος των μαδεριών της επικάλυψης.



Σχήμα 10-6. Οριζόντια πλαίσια και κατακόρυφη κάλυψη

Οι δακτύλιοι κατασκευάζονται επί τόπου και συγκρατούνται στη θέση τους με αποστατήρες ράβδους που τοποθετούνται μεταξύ των κορμών των τόξων. Ακολουθεί η τοποθέτηση της κατακόρυφης επικάλυψης. Η απόσταση των δακτυλίων καθορίζεται από τα φορτία που αναμένεται να αναλάβουν. Δεδομένου ότι το έδαφος πρέπει αρχικά να είναι ευσταθές για το ύψος της επικάλυψης, η μέθοδος αυτή συνήθως χρησιμοποιείται σε συνεκτικά εδάφη. Κατά την κατασκευή, το χρονικό διάστημα μεταξύ εκσκαφής και τοποθέτησης της επικάλυψης, πρέπει να ελαχιστοποιείται ώστε να αποφεύγονται αστοχίες ή απώλεια εδάφους.

10.1.3.3 Συστήματα διάνοιξης τύπου ΝΑΤΜ

Πρόκειται για μια μέθοδο κατασκευής που εφαρμόζει τις αρχές της ΝΑΤΜ. Χρησιμοποιούνται ως υλικά υποστήριξης εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (Σχήμα 10-7), δομικό πλέγμα, και χαλύβδινες δικτυωτές δοκοί, και η συμπεριφορά της διάνοιξης ελέγχεται με όργανα. Η εκσκαφή και υποστήριξη είναι διαδοχικές εργασίες. Με την αποκάλυψη της παρειάς της εκσκαφής, τοποθετείται σε αυτήν ένα πλαίσιο από χαλύβδινα δικτυωτά τόξα.



Σχήμα 10-7. Διάνοιξη με τη ΝΑΤΜ

Πλεονέκτημα χρήσης του δικτυωτού τόξου είναι η ελαφρότητά του, που δίνει τη δυνατότητα εύκολης χειρωνακτικής εγκατάστασης. Στη συνέχεια τοποθετείται δομικό πλέγμα και εκτοξεύεται σκυρόδεμα στην παρειά της εκσκαφής. Συνήθως γύρω στα 15 cm σκυροδέματος είναι επαρκή, αλλά αν τα όργανα δείξουν ότι το έδαφος μετατοπίζεται ή άλλα ανεπιθύμητα χαρακτηριστικά, το πάχος του σκυροδέματος μπορεί να διπλασιαστεί ή και να γίνει ακόμη περισσότερο. Χαρακτηριστικό σχήμα της διατομής της διάνοιξης είναι το οβάλ ή κυκλικό, που αντικαθιστά το πιο συμβατικό ορθογώνιο σχήμα που χρησιμοποιείται συνήθως για τα φρέατα εξαερισμού των μετρό.

10.1.4 Αντιμετώπιση της υδροφορίας των εδαφών

Η εκσκαφή σε υγρό έδαφος μπορεί να επιτευχθεί με πολλούς τρόπους. Η συνηθέστερη μέθοδος είναι η ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα στην περιοχή εργασίας (Jenny, 1996). Άλλες μέθοδοι περιλαμβάνουν την ένεση του εδάφους, την κατάψυξή του, τη χρήση μπεντονίτη, και τη βύθιση κιβώτιου με χρήση πιεσμένου αέρα ή με βυθοκόρηση.

10.1.4.1 Ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα

Αν και η απάντληση φρεάτων μπορεί να είναι χρονοβόρα, η ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα για την εκσκαφή εξασφαλίζει ξηρές, ασφαλείς, και σταθερές συνθήκες εργασίας. Προκειμένου να προσδιοριστεί πριν από την κατασκευή το κατάλληλο σύστημα ελέγχου των υπογείων υδάτων, πρέπει να αξιολογηθούν οι γεωλογικές πληροφορίες και να πραγματοποιηθεί δοκιμή άντλησης στο έδαφος. Η δοκιμή θα πρέπει να έχει ως αποτέλεσμα μια συσχέτιση του υποβιβασμού του υδροφόρου ορίζοντα με το χρόνο και την απόσταση. Η

δοκιμή άντλησης πρέπει να αποφέρει στοιχεία, όπως τον όγκο του αντλούμενου νερού, την παροχή της πηγής, και τον χρόνο που απαιτείται για να επιτευχθεί ισορροπία. Είναι σκόπιμο να γίνεται χημική ανάλυση των υπογείων υδάτων ώστε να ελέγχεται για διαλυμένα άλατα ή αέρια. Άλατα ασβεστίου και οξείδια του σιδήρου στο νερό δύνανται να διαβρώνουν τα μεταλλικά τμήματα του συστήματος άντλησης. Εφόσον χρησιμοποιηθούν μεταλλικές εσχάρες, μπορεί να βουλώσουν από άλατα που καθιζάνουν. Οι αντλήσεις δύνανται να έχουν ως αποτέλεσμα τον υποβιβασμό του υδροφόρου ορίζοντα στις παρακείμενες περιοχές, σε ορισμένες περιπτώσεις, μέχρι και 500 m ή και περισσότερο από τη θέση άντλησης. Η άντληση αυξάνει τις ενεργές τάσεις στο έδαφος, και ως εκ τούτου προκαλεί καθιζήσεις. Επίσης, σε περιπτώσεις όπου γειτονικά δομήματα εδράζονται σε πασσάλους, μπορεί να αναπτυχθεί αρνητική τριβή σε αυτούς, η οποία θα προκαλέσει καθιζήσεις. Ως εκ τούτου, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται, εάν η περιοχή απάντλησης γειτνιάζει σε μεγάλα δομήματα. Επαναφόρτιση των υπόγειων υδάτων ή άλλες λύσεις πιθανόν να απαιτούνται για την ελαχιστοποίηση των καθιζήσεων σε γειτονικά δομήματα. Η απάντληση του νερού δύναται να επιτευχθεί είτε με ανοικτή άντληση είτε με σύστημα σημειακών πηγών ή με βαθιές πηγές άντλησης.

Η απλούστερη μέθοδος εκσκαφής φρέατος σε υδροφόρα διαπερατά εδάφη είναι η στεγανή περίκλειση και *ανοικτή άντληση*. Αυτή συνίσταται στην έμπηξη πασσαλοσανίδων (βλέπε § 10.1.2.2), την εκσκαφή και την άντληση του νερού από τον πυθμένα της εκσκαφής. Ωστόσο, η άντληση μπορεί να προκαλέσει διήθηση του νερού και απώλεια λεπτομερών γύρω από τον πόδα της σανίδας. Επιπλέον, αν η πίεση λόγω της ανοδικής διήθησης του νερού γίνει μεγαλύτερη από την πίεση του εδάφους στον πυθμένα της εκσκαφής, μπορεί να προκαλέσει γοργή ή αναβράζουσα κατάσταση του εδάφους. Επίσης, εάν η διήθηση του νερού γύρω από τον πόδα της σανίδας εκτοπίζει σημαντικά τα σωματίδια του εδάφους, οι σανίδες μπορεί να υποσκαφτούν.

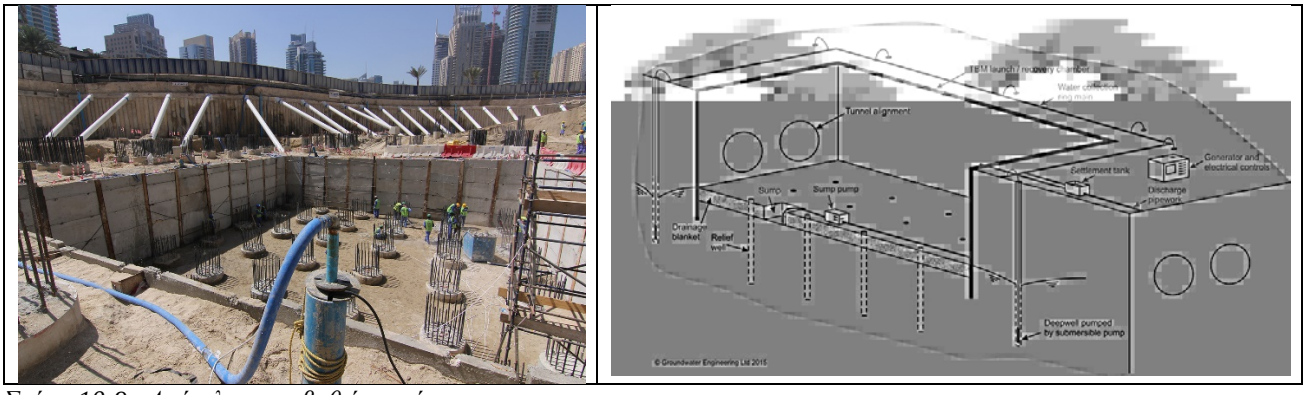


Σχήμα 10-8. Απάντληση με σημειακές πηγές

Σύστημα *σημειακών πηγών άντλησης* (Σχήμα 10-8) χρησιμοποιείται γενικά για την απάντληση σε βάθος μέχρι περίπου 5m. Πρόκειται για την πιο κοινή μέθοδο αποστράγγισης ρηχών ανοικτών εκσκαφών. Η τεχνική είναι κατάλληλη σε εδάφη χαρακτηριζόμενα από μέτριες έως λεπτές άμμοι και για εργασίες μικρής διάρκειας. Η μέθοδος συνίσταται στην τοποθέτηση σημειακών πηγών σε απόσταση μεταξύ τους 1 έως 4 m στην περιφέρεια της εκσκαφής. Οι σημειακές αντλήσεις συνάπτονται σε μια κοινή κεντρική σωλήνα, που συνδέεται με μια αντλία. Οι σημειακές πηγές είναι εσχάρες που απαιτούν κατάλληλο υλικό φίλτρου γύρω από την εσχάρα για την αποτροπή της μεταφοράς των σωματιδίων του εδάφους με το νερό. Μόλις ολοκληρωθεί η άντληση, η εκσκαφή του φρέατος μπορεί να ξεκινήσει. Ωστόσο, το σύστημα των σημειακών πηγών πρέπει να λειτουργεί κατά τη διάρκεια της εκσκαφής, ώστε να μην επιστρέψει το νερό στο αρχικό του επίπεδο. Τα κύρια

μειονεκτήματα του συστήματος είναι η ανάγκη τοποθέτησής του εντός του χώρου της εκσκαφής και ότι το βάθος της αποστράγγισης περιορίζεται στα ~5 m.

Βαθιές πηγές απάντλησης (Σχήμα 10-9) μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την αποστράγγιση υλικών σε οποιοδήποτε βάθος απαιτείται από την εκσκαφή και μπορεί να εγκατασταθούν έξω από τη ζώνη της εκσκαφής. Το σύστημα συνίσταται από υδρογεωτρήσεις διαμέτρου από 15 έως 45 cm σε αποστάσεις 6 – 60 m, ανάλογα με τη διαπερατότητα, το βάθος αποστράγγισης, κ.λπ. Οι υδρογεωτρήσεις έχουν έναν εμπορικό τύπο εσχάρας νερού που περιβάλλεται από κατάλληλης διαβάθμισης φίλτρο άμμου-χαλικιών. Κάθε πηγή είναι εφοδιασμένη με τη δική της υποβρύχια αντλία. Η εκσκαφή για το φρέαρ αρχίζει μετά την επίτευξη του υποβιβασμού της στάθμης του νερού στο απαιτούμενο βάθος ή πιθανώς λίγο νωρίτερα, σύμφωνα με τον τύπο υποστήριξης του φρέατος και εφόσον έχει επιτευχθεί σταθεροποίηση του ρυθμού ταπείνωσης. Για εκσκαφή φρεάτων, οι βαθιές υδρογεωτρήσεις δύνανται να προσφέρουν υποβιβασμό της στάθμης του νερού στο επιθυμητό βάθος. Πλεονέκτημα τους είναι ότι απαιτείται να εγκατασταθούν σχετικά λίγες μόνο μονάδες και μόλις εγκατασταθούν σωστά, το μόνο που χρειάζεται είναι η συντήρηση. Ωστόσο, μόνο διαπερατά στρώματα μπορούν να αποστραγγιστούν με τη μέθοδο αυτή.



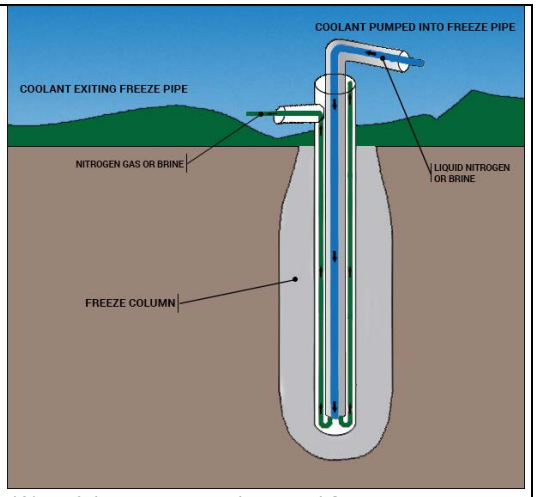
Σχήμα 10-9. Απάντληση με βαθιές πηγές

10.1.4.2 Κατάψυξη

Σε υδροφόρα πετρώματα όταν ακόμη και η ελάχιστη καθίζηση στην επίγεια επιφάνεια δεν είναι ανεκτή, όπως δίπλα σε μεγάλα κτήρια, η κατάψυξη του εδάφους και στη συνέχεια η εκσκαφή αποτελεί την πιο αξιόπιστη μέθοδο κατασκευής του φρέατος. Η κατάψυξη καταργεί τόσον τη διήθηση όσον και την πλαστική διαρροή του εδάφους. Η μέθοδος εφαρμόστηκε για πρώτη φορά το 1883. Δεν υπάρχει περιορισμός όσον αφορά το βάθος στο οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος. Η διαδικασία συνίσταται στη όρυξη 20 έως 50 γεωτρήσεων γύρω από την περιοχή που πρόκειται να εκσκαφτεί, εντός των οποίων τοποθετούνται οι σωλήνες κατάψυξης (Σχήμα 10-10α). Μέσα από τους σωλήνες κυκλοφορεί ψυχρό διάλυμα άλμης, που έχει ως αποτέλεσμα την κατάψυξη ενός τοίχου εδάφους. Στη συνέχεια μπορεί να ξεκινήσει η εκσκαφή. Εφόσον πρόκειται να τοποθετηθεί επένδυση από σκυρόδεμα, αυτή θα διαμορφωθεί έναντι του παγωμένου εδάφους. Το κύκλωμα ψύξης σε κάθε διάτρημα συνίσταται από μία σωλήνα κλειστή στο ένα άκρο, που περιέχει μία άλλη σωλήνα μικρότερης διαμέτρου, ανοικτού άκρου (Σχήμα 10-10β). Η άλμη ψύχεται στην επίγεια εγκατάσταση ψύξης, στη συνέχεια, κυκλοφορεί προς τα κάτω, εισέρχεται στην εσωτερική σωλήνα και επιστρέφει μέσω του δακτυλιοειδή χώρου μεταξύ των σωλήνων στην επίγεια εγκατάσταση. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι το έδαφος να παγώσει επαρκώς. Το χρονικό διάστημα μέχρι την έναρξη εκσκαφής του φρέατος ποικίλει μεταξύ δύο και πέντε μηνών, ανάλογα με το βάθος, τον τύπο του εδάφους, καθώς και άλλους παράγοντες. Τα κυριότερα μειονεκτήματα της τεχνικής είναι ο χρόνος που απαιτείται για το πάγωμα του εδάφους και το κόστος του εξοπλισμού. Βέβαια, η εγκατάσταση κατάψυξης μπορεί να φυλαχτεί και να επαναχρησιμοποιηθεί. Ως εναλλακτική λύση της άλμης ως ψυκτικού, χρησιμοποιείται μερικές φορές υγρό άζωτο που επιταχύνει τη διαδικασία κατάψυξης.



(α) Σύστημα κατάψυξης γύρω από φρέαρ



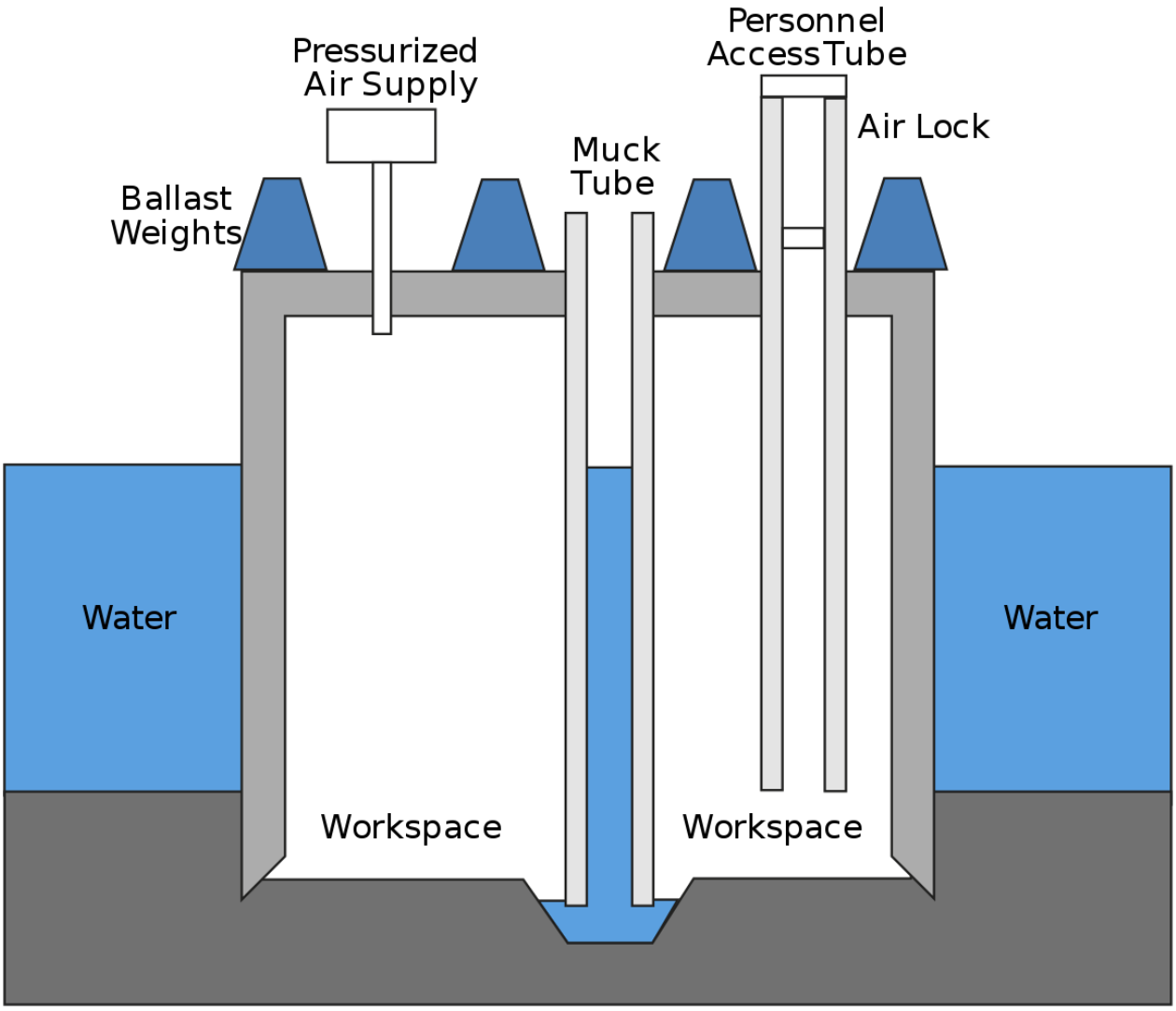
(β) Σωλήνα μεταφορά της ψύξης

Σχήμα 10-10. Κατάψυξη του εδάφους γύρω από φρέαρ

10.1.4.3 Βυθιζόμενα κιβώτια

Το φρέαρ ξεκινά με εκσκαφή μικρού βάθους και τοποθέτηση στον πυθμένα του, του κοπτικού άκρου του κιβωτίου. Στη συνέχεια τοποθετούνται σταδιακά καθ' ύψος τα προκατασκευασμένα κιβώτια που βυθίζονται με το ίδιο ή και πρόσθετο (ballast) βάρος τους (Σχήμα 10-11), καθώς εκσκάπτεται το μέτωπο και υποσκάπτεται το κοπτικό άκρο του κιβωτίου, στον εκάστοτε πυθμένα της διάνοιξης.

Με την ελαφρού τύπου μηχανή VSM, η οποία δεν διαθέτει εξέδρες εργασίας, επιτυγχάνεται παρόμοια βύθιση. Τα τοιχώματα επενδύονται με προκατασκευασμένα ή επιτόπου έγχυτα στοιχεία σκυροδέματος, τα οποία τοποθετούνται στην επίγεια επιφάνεια στο στόμιο του φρέατος και βυθίζονται καθώς το έδαφος στον πυθμένα του φρέατος υποσκάπτεται στο εκεί άκρο του κιβωτίου. Η μηχανή αυτή έχει ιδιαίτερη εφαρμογή για υποβρύχια διάνοιξη και δυνατότητα βύθισης φρεάτων διαμέτρου 5 έως 10 m σε βάθος μέχρι 65 m. Αποτελείται από 2 τμήματα: τη μηχανή εξόρυξης και τη μονάδα βύθισης. Η μηχανή εξόρυξης κατεβαίνει στο βάθος του φρέατος και πακτώνεται με τρεις ωστήρες στα τοιχώματα. Ένα περιστρεφόμενο κοπτικό τύμπανο εφοδιασμένο με κοπτικά δόντια προσαρτάται στον τηλεσκοπικό βραχίονα και εκσκάπτει το πέτρωμα. Πλεονεκτήματα της μηχανής είναι: (α) Όλες οι λειτουργικές διαδικασίες ελέγχονται και παρακολουθούνται από την επιφάνεια. (β) Όλες οι διαθέσιμες πληροφορίες σχετικά με την εκσκαφή συλλέγονται και απεικονίζονται στο θάλαμο ελέγχου. Εκεί ο χειριστής έχει μια πλήρη εικόνα της κατάστασης και μπορεί ανά πάσα στιγμή να ανταποκριθεί αναλόγως. (γ) Μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής ή κατά την αλλαγή των εργαλείων κοπής, η μηχανή εξόρυξης του φρέατος ανακτάται χρησιμοποιώντας τα βαρούλκα ανάκτησης. (δ) Ο σχεδιασμός του συστήματος, σε επιμέρους στοιχεία, εξυπηρετεί τη μεταφορά του στην πόλη και τη διάταξή του όπως απαιτείται. Για παράδειγμα, η μονάδα διαχωρισμού μπορεί να εγκατασταθεί σε έναν δρόμο δίπλα στο εργοτάξιο, αν δεν υπάρχει αρκετός χώρος δίπλα στον φρέαρ.



Σχήμα 10-11. Βυθιζόμενο κιβώτιο



(α) Μηχανή εντός φρέατος

(β) Κοπή της γεωμάζας από τη φρέζα

Σχήμα 10-12. Μηχανή κατακόρυφης βύθισης φρεάτων (VSM)

10.1.5 Τελική επένδυση αβαθών φρεάτων

Η μόνιμη επένδυση των φρεάτων είναι συνήθως από έγχυτο σκυρόδεμα (Σχήμα 10-13α), μολονότι και το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (Σχήμα 10-13β) είναι όλο και περισσότερο αποδεκτό. Η προβλεπόμενη μόνιμη χρήση του φρέατος μπορεί να καθορίσει τον τύπο της τελικής επένδυσης.

Κάθε φρέαρ που βυθίζεται μέσα σε μαλακό έδαφος απαιτεί μια άμεση πρωτογενή επένδυση για υποστήριξη. Αυτή θα πρέπει να έχει το σωστό σχήμα, και άμεση συνεχή επαφή με το έδαφος. Η δευτερογενής (μόνιμη) επένδυση μπορεί είτε να εγχέεται επί της πρωτογενούς (άμεσης) με εσωτερικό μεταλλότυπο είτε να διαμορφώνεται από μεταλλότυπους τόσον εξωτερικούς όσο και εσωτερικούς. Εάν η επένδυση διαμορφώνεται με εξωτερικό μεταλλότυπο, ο δακτυλιοειδής χώρος μεταξύ της πρωτογενούς και της δευτερογενούς επένδυσης πρέπει να γομώνεται πυκνά με χαλικάκι, καλά διαβαθμισμένη άμμο ή άλλο κατάλληλο υλικό. Εφόσον το φρέαρ εκσκάπτεται σε υδροφόρο έδαφος, η τοποθέτηση αδιαπέρατης μεμβράνης στην επιφάνεια της αρχικής επένδυσης πριν από τη σκυροδέτηση της μόνιμης επένδυσης, έχει καταστεί τελευταία κοινή πρακτική. Επιπρόσθετα, μπορεί να απαιτηθούν τσιμεντενέσεις για την αποτροπή της διήθησης νερού στο τελειωμένο φρέαρ. Εφόσον η αρχική υποστήριξη είναι από ήλους και πλέγμα μόνον, το έγχυτο σκυρόδεμα της τελικής επένδυσης έρχεται είτε σε άμεση επαφή με το πέτρωμα είτε σε επαφή με μεμβράνη στεγανοποίησης.



(α) Έγχυτο σκυρόδεμα



(γ) Προκατασκευασμένα τόξα



(β) Εκτοξευμένο σκυρόδεμα

Σχήμα 10-13. Τελική επένδυση

Προκατασκευασμένα τόξα (Σχήμα 10-13γ) από σκυρόδεμα, που σχηματίζουν δακτυλίους, μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης ως τελική επένδυση, όπου τα τόξα τοποθετούνται από κάτω προς τα πάνω. Αυτό δημιουργεί ένα δακτυλιοειδές κενό μεταξύ επένδυσης και πετρώματος, που πρέπει να πληρωθεί μετά την ολοκλήρωση της επένδυσης.

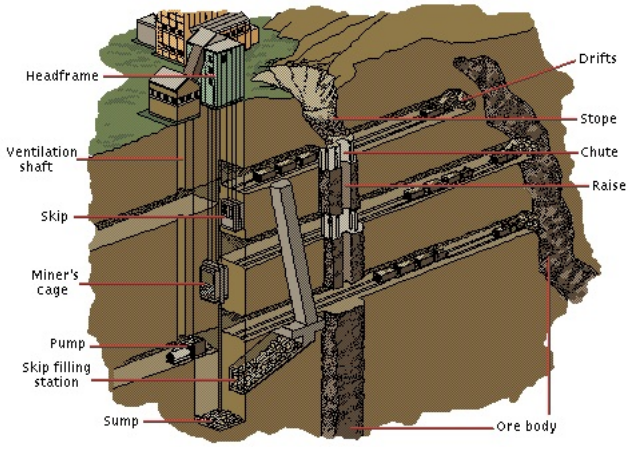
10.2 Βαθιά εξωαστικά φρέατα

10.2.1 Εισαγωγή

Τα πολύ βαθιά φρέατα συνδέονται παραδοσιακά με τη βιομηχανία εξόρυξης χρυσού στη Νότια Αφρική, όπου το βάθος των 2000 έως 2500 m είναι σύνηθες (Hustrulid & Bullock, 2001). Σε καλά σκληρά πετρώματα και ξηρές συνθήκες, κυκλικά φρέατα με επενδύσεις από σκυρόδεμα, εσωτερικής διαμέτρου από 7.5 έως 9.0 m έχουν βυθιστεί συμβατικά και επενδυθεί με ρυθμούς που φτάσανε τα 381.2 m τον Μάρτιο του 1962 στο Buffelsfontein Eastern Twin Shaft. Σε αντίθεση με τα φρέατα μεταλλείων (Σχήμα 10-14α), όπου βάθη 800 m είναι συνήθη για πάνω από έναν αιώνα, τα πιο βαθιά φρέατα στα τεχνικά έργα σπάνια υπερβαίνουν τα 600 m βάθος. Οι εφαρμογές τους περιλαμβάνουν φρέατα εξαερισμού σε βάθος πάνω από 600 μέτρα για μεγάλες συγκοινωνιακές σήραγγες κάτω από ψηλά βουνά, όπως οι σήραγγες κάτω από τις Άλπεις που συνδέουν αστικά κέντρα στην Ελβετία, την Αυστρία και την Ιταλία, και υψηλής πίεσης φρέατα προσαγωγής, βάθους 600 έως 900 m για βαθιά υδροηλεκτρικά έργα ισχύος ή αποθήκευσης ενέργειας με άντληση.

Τα βαθιά φρέατα ή κεκλιμένα, γενικά, προσφέρουν κατακόρυφη ή παρακατακόρυφη πρόσβαση σε υπόγεια ανοίγματα, όπως σε σήραγγες υδραυλικές, συγκοινωνιακές (Σχήμα 10-14β), εξυπηρέτησης, σταθμούς παραγωγής ισχύος, θαλάμους αποθήκευσης, στρατιωτικές ή επιστημονικές εγκαταστάσεις. Επίσης, δίνουν τη δυνατότητα γεωλογικής διερεύνησης, εξαερισμού, εγκατάστασης μηχανών TBM, κλπ..

Τα βαθιά φρέατα, μπορούν να είναι κατακόρυφα ή κεκλιμένα, και διανοίγονται είτε από πάνω προς τα κάτω είτε αντιστρόφως. Το ανιόν (ανυψούμενο, raise) διανοίγεται με ανιούσα φορά ενώ το κατιόν (βυθιζόμενο, winze – sinking shaft) διανοίγεται με κατιούσα φορά. Κατά τη διάνοιξη του ανιόντος, οι ορύχοι πλησιάζουν από κάτω το μη επενδυμένο χαλαρωμένο πέτρωμα του μετώπου μετά από κάθε βήμα ανατίναξης. Αντιθέτως, σε ένα κατιόν δεν υπάρχει κανένα τέτοιο πρόβλημα, όμως τα πόδια των εργαζομένων, στις περισσότερες περιπτώσεις, βρίσκονται μέσα στο νερό. Κατά την ανύψωση (raising), η βαρύτητα βοηθά στην ανόρυξη των διατρημάτων και στην αποκομιδή των μπαζών, κάνοντας τη διαδικασία ταχύτερη και φθηνότερη. Αντίθετα, κατά τη βύθιση (sinking) η βαρύτητα επιβραδύνει την ταχύτητα διάτρησης και τα μπάζα από την ανατίναξη χρειάζονται ανέλκυση. Επομένως, η βύθιση ενός φρέατος είναι μια αργή, κουραστική και δαπανηρή διαδικασία, που όμως παρέχει καλύτερη ασφάλεια στους εργαζόμενους σε σχέση με την ανύψωση. Η ανύψωση θεωρούνταν ως μια από τις πιο επικίνδυνες εργασίες εξόρυξης αλλά με την εφαρμογή νέων τεχνικών η διαδικασία έχει γίνει ασφαλής και οικονομικότερη από τη βύθιση. Ωστόσο, η βύθιση είναι η μοναδική μέθοδος για την απόκτηση πρόσβασης σε βαθύτερους ορίζοντες, ενώ η ανύψωση είναι μια καθιερωμένη πρακτική για τη σύνδεση των χαμηλότερων επιπέδων, με τα ανώτερα.



(α) Μεταλλευτικά φρέατα



(β) Φρέαρ σιδηροδρομικής σήραγγας στο Hong Kong

Σχήμα 10-14. Φρέατα και κεκλιμένα

Η βύθιση φρεάτων είναι μια εξειδικευμένη εργασία, η οποία απαιτεί εκπαιδευμένους και ικανούς ορύχους. Μεταξύ των διαφόρων τύπων υπογείων διανοίξεων, για πολιτικά και μεταλλευτικά έργα, τα κατακόρυφα ή κεκλιμένα κατιόντα είναι τα δαπανηρότερα στη διάνοιξη, λόγω της αργής και κοπιαστικής διαδικασίας. Οι αποφάσεις σχετικά με το μέγεθος, τη μορφή και την τοποθέτηση λαμβάνονται με βάση το σκοπό που προορίζεται να εξυπηρετήσει το φρέαρ. Τα κυκλικά φρέατα προτιμώνται σχεδόν σε όλες τις

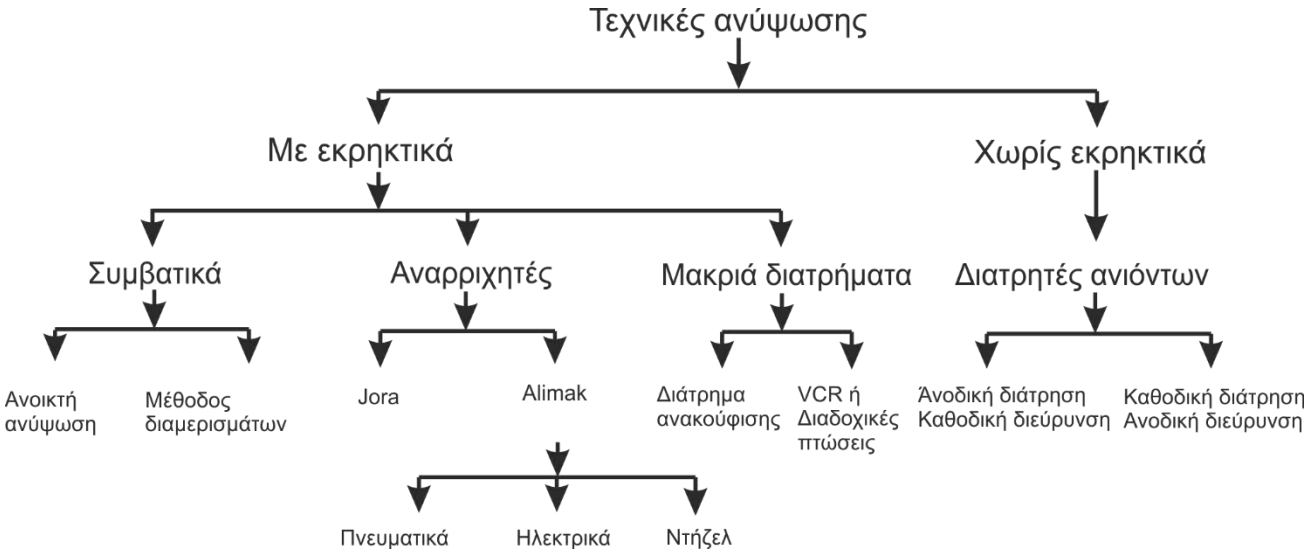
καταστάσεις, λόγω της σταθερότητάς τους, και αποτελούν τη συνήθη επιλογή. Τα ορθογώνια ή ελλειπτικά φρέατα, μολονότι πλεονεκτούν ως προς την καλύτερη χρήση της διατομής τους, σπανιότερα χρησιμοποιούνται σήμερα.

Παραδοσιακά η διάνοιξη των φρεάτων πραγματοποιείται με την τεχνική διάτρηση-ανατίναξη. Μετά το 1960 άρχισε να αναπτύσσεται η μηχανική όρυξη φρεάτων με χρήση διατρητικών μηχανών (διατρητών-borers) μεγάλης διαμέτρου, που συναγωνίζονται με επιτυχία τις παραδοσιακές μεθόδους, όταν η αντοχή του πετρώματος σε συνδυασμό με τα φθοροποιά του χαρακτηριστικά το επιτρέπουν.

10.2.2 Ανιόντα

Τα ανιόντα φρέατα βρίσκουν εφαρμογές σε: (i) Υδροηλεκτρικά έργα (α) θάλαμος ανάπαλσης, β) φρέαρ εξαερισμού, (γ) φρέαρ ανελκυστήρα, (δ) φρέαρ προσαγωγής, ε) φρέαρ καλωδίων, κλπ., (ii) Ύδρευση: α) φρέαρ πρόσβασης ή συντήρησης, β) εξαερισμός, (γ) παροχή σε υψηλότερο επίπεδο, (δ) φρέατα ανόδου και καθόδου, (iii) Αποχέτευση, πχ. φρέατα πτώσης λυμάτων, (iv) Σήραγγες: α) φρέαρ εξαερισμού, β) περιβλήματα επιταχυντών, γ) φρέατα πρόσβασης.

Από άποψη διάνοιξης, ταξινομούνται είτε ως τυφλά είτε ως διαθέτοντα δύο επίπεδα πρόσβασης σε αυτά. Τα πρώτα διανοίγονται πιο δύσκολα από τα δεύτερα. Ως προς την εξόρυξη ταξινομούνται με βάση τη χρήση (Σχήμα 10-16 & Σχήμα 10-17 ή τη μη χρήση (Σχήμα 10-18) εκρηκτικών. Το παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 10-15) παρουσιάζει μια ταξινόμηση με βάση τα δύο αυτά κριτήρια. Τα εκρηκτικά που χρησιμοποιούνται είναι συμβατικά.



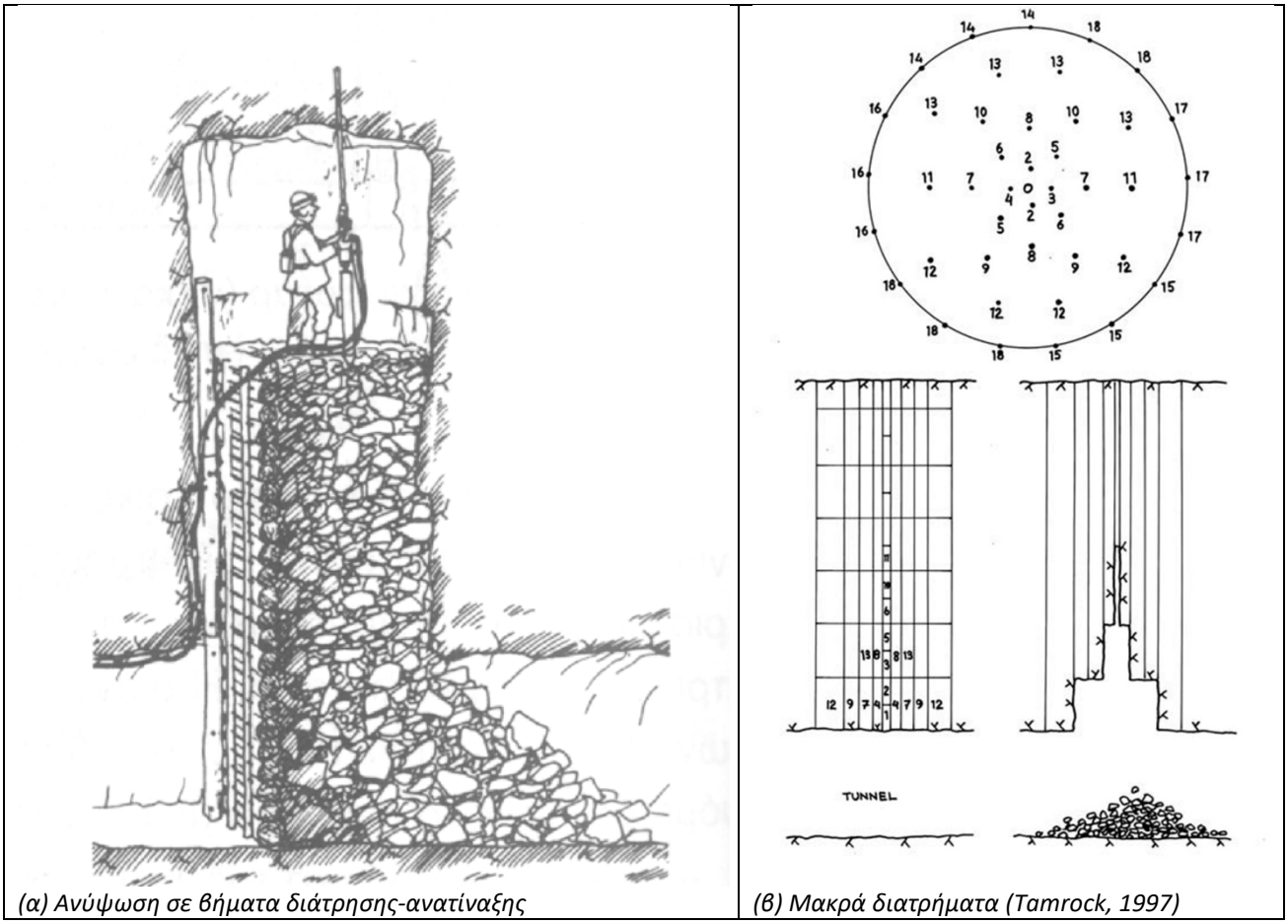
Σχήμα 10-15. Ταξινόμηση τεχνικών κατακόρυφης / ισχυρά κεκλιμένης ανύψωσης με βάση το μηχανισμό κατακερματισμού του πετρώματος και τη διαθεσιμότητα πρόσβασης στα επίπεδα εκκίνησης και άφιξης κατά τη διάρκεια της διάνοιξης.

10.2.2.1 Συμβατικές μέθοδοι

Η τεχνική ανοιχτής ανύψωσης εξακολουθεί να εφαρμόζεται στη διάνοιξη μικρού μήκους ανυψούμενων μέχρι 10 m, και στη μέθοδο των διαμερισμάτων μέχρι 25 m. Η μέθοδος συνίσταται στην κατασκευή ξύλινου σκελετού που καλύπτει τμήμα της διατομής του φρέατος, ώστε να εξασφαλίζεται η επικοινωνία με το μέτωπο εργασίας μέσω σκάλας, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 10-16. Η ξύλινη αυτή κατασκευή επεκτείνεται διαρκώς (Τσουτρέλης, 2001β) με την ανύψωση του μετώπου. Από το εκάστοτε δάπεδό της και αυτό που σχηματίζει το θραυσμένο πέτρωμα διανοίγονται διατρήματα που επιτυγχάνουν προχώρηση 1-2 m.

Για μεγαλύτερη παραγωγικότητα και ασφάλεια, όταν υπάρχει πρόσβαση στα επίπεδα εκκίνησης και άφιξης και η απόσταση μεταξύ τους το επιτρέπει, η διάνοιξη του φρέατος δύναται να πραγματοποιείται με διατρήματα μεγάλου μήκους. Σύμφωνα με την τεχνική αυτή διανοίγονται από την επάνω στοά όλα τα διατρήματα στο πλήρες μήκος του φρέατος και στη συνέχεια γομώνονται σταδιακά και ανατινάζονται από κάτω προς τα πάνω με βήμα προχώρησης 2-4 m κάθε φορά. Στις μεθόδους αυτές η φόρτωση του εξορυχθέντος υλικού πραγματοποιείται από τηλεχειριζόμενο φορτωτή. Η μέθοδος εφαρμόζεται σε εξορύξεις ανιόντων έως 40 m, όπου τα ίδια διατρητικά φορεία και οι ίδιοι ορύχοι χρησιμοποιούνται για όλες τις διατρήσεις. Χρήση

μακρών διατρημάτων μπορεί να εφαρμοστεί είτε με χρήση διατρήματος ανακούφισης είτε με μεθόδους VCR ή διαδοχικών πτώσεων (drop raising).



(α) Ανύψωση σε βήματα διάτρησης-ανατίναξης *(β) Μακρά διατρήματα (Tamrock, 1997)*

Σχήμα 10-16. Συμβατική διάνοιξη τυφλών ανιόντων.

Το διάτρημα ανακούφισης της πρώτης μεθόδου διανοίγεται με διάμετρο 51-75 mm που στη συνέχεια διευρύνεται σε 100-200 mm. Τα διατρήματα κύριας και περιμετρικής εκσκαφής είναι διαμέτρου 57-65 mm. Οι ανατινάξεις πραγματοποιούνται από κάτω προς τα πάνω, με προχώρηση ~2-4 m ανά ανατίναξη. Συνηθέστερη είναι η πρακτική κατά την οποία προηγείται η διάνοιξη της προεκσκαφής σε σημαντικό βάθος του φρέατος, μετά ακολουθεί η κύρια εκσκαφή, με τελευταία την ανατίναξη των περιμετρικών, που εφόσον απαιτούνται λεία τοιχώματα είναι πυκνότερα διαταγμένα.

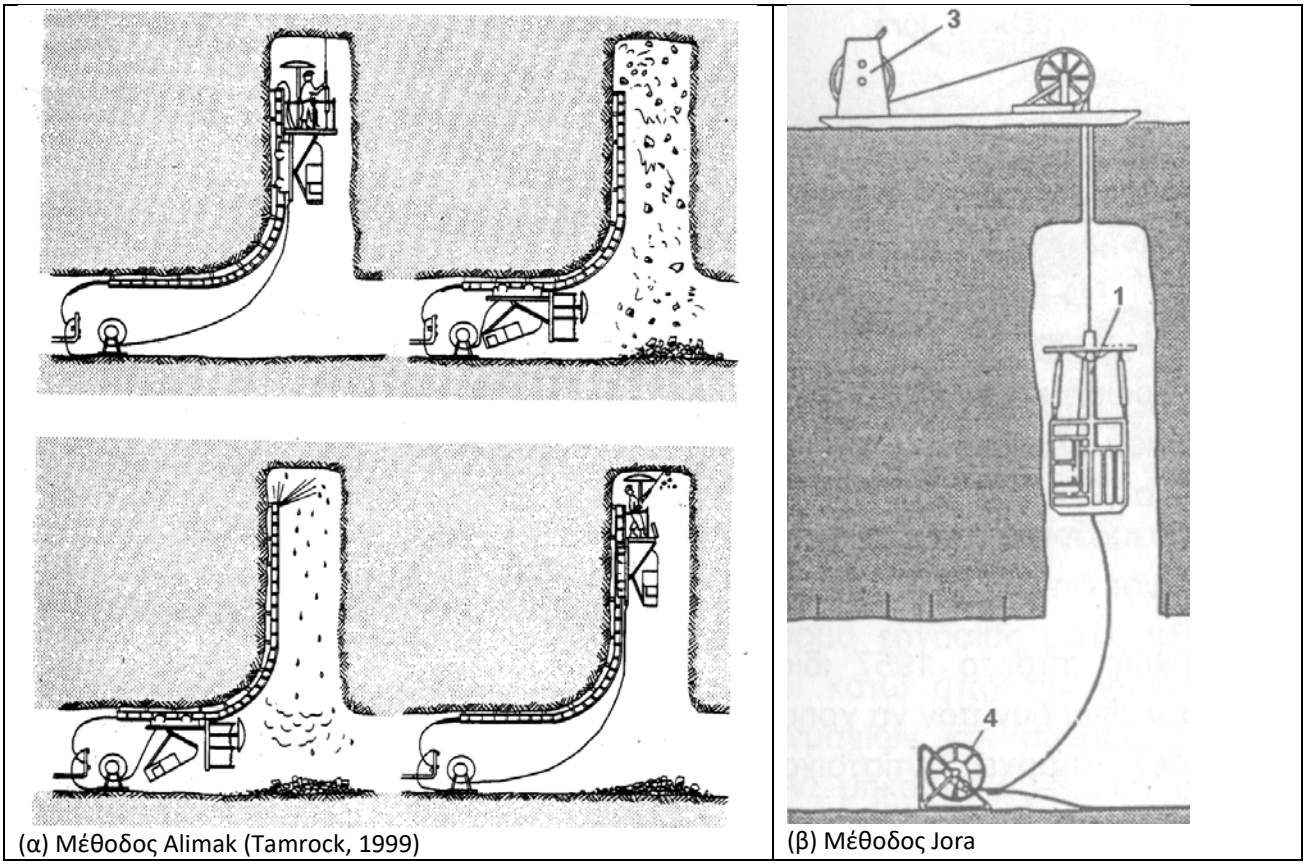
Κατά την μέθοδο VCR, με χρήση ενδοδιατρηματικής κρουστικής αερόσφυρας διανοίγεται ένας αριθμός μεγάλης διαμέτρου διατρημάτων (125-165 mm) σε όλο το ύψος του προς διάνοιξη φρέατος, τα οποία γομώνονται και ανατινάζονται σταδιακά εκ των κάτω προς τα άνω. Για παράδειγμα (Τσουτρέλης, 2001) η μέθοδος εφαρμόζεται με τα παρακάτω χαρακτηριστικά: διάμετρος διατρημάτων 165 mm, μήκος γόμωσης 1 m, λόγος μήκους γόμωσης προς διάμετρο 6, ποσότητα εκρηκτικής ύλης/διάτρημα 21 kg, εκρηκτική ύλη Slurry σε φυσίγγια, (3 των 7 kg το κάθε διάτρημα) και προχώρηση ανά ανατίναξη 3 m. Αντίστοιχη μέθοδος είναι η των διαδοχικών πτώσεων (drop raising). Αναφέρεται διάνοιξη, με τη μέθοδο, τετραγωνικού φρέατος διατομής 3×3 m, στην Ινδία. Το φρέαρ διανοίχθηκε μεταξύ ορόφων που βρίσκονταν σε κατακόρυφη απόσταση 57 m. Τα διατρήματα ήταν 1 στο κέντρο και τέσσερα στις γωνίες, όλα διαμέτρου 165 mm. Η γόμωση πραγματοποιούνταν και στα 5 διατρήματα από το πάνω επίπεδο. Κάτω κάτω σε κάθε διάτρημα τοποθετήθηκε ένα πώμα. Πάνω από κάθε πώμα τοποθετήθηκε επιγόμωση από αδρανή 12 mm σε μήκος 1 m, ακολουθούμενη προς τα πάνω από εκρηκτικό slurry σε φυσίγγια σε μήκος 1.2 m. Ο λόγος μήκους υπονόμου προς διάμετρο ήταν 6 ώστε να εξασφαλίζει πρακτικά μια σφαιρική διάδοση του κύματος της έκρηξης. Η ποσότητα εκρηκτικής ύλης ανά διάτρημα ήταν 34 kg. Πάνω από το slurry τοποθετούνταν επιγόμωση από άμμο σε μήκος 1.8 m, και το λοιπό προς τα πάνω διάτρημα παρέμενε κενό. Γινότανε χρήση καψυλλίων επιβράδυνσης. Η οροφή της κάτω στοάς παρείχε την αρχική ελεύθερη επιφάνεια, και το αποτέλεσμα της ανατίναξης ήταν ένας κενός χώρος

ύψους 1.8 m. Η διαδικασία επαναλαμβάνονταν καθ' ύψος, και με κάθε ανατίναξη το φρέαρ ανυψωνόταν κατά 1.8 m. Τα τελευταία 4 m των υπονόμων ανατινάχθηκαν σε ένα βήμα. Η ανύψωση διήρκεσε 20 ημέρες. Με τη μέθοδο διανοίχθηκαν και άλλα ανιόντα ύψους μέχρι και 80 m.

10.2.2.2 Ανύψωση με μηχανικούς αναρριχητές

Η σουηδική εταιρεία Alimak εισήγαγε τον αναρριχητή αυτό το 1957 και, ακόμη και σήμερα, η χρήση του είναι απαραίτητη για την οδήγηση τυφλών ανιόντων μεγαλύτερων μηκών. Ο αναρριχητής Alimak, έχει σχεδιαστεί για να διανοίγει ανιόντα έως και 100 m, ή και πιο πολύ. Διατίθενται πνευματικοί, ηλεκτρικοί και πετρελαιοκίνητοι (υδραυλικοί) αναρριχητές. Ο εξοπλισμός συνίσταται από κλωβό, στο άνω μέρος του οποίου υπάρχει πλατφόρμα εργασίας εφοδιασμένη με καλύπτρα προστασίας των εργαζομένων. Ο κλωβός κινείται επί σιδηροτροχιάς που στερεώνεται στο τοίχωμα του φρέατος με τη βοήθεια ειδικών ήλων και οδηγείται με τη βοήθεια κινητήρα. Οι φάσεις εργασίας απεικονίζονται στο Σχήμα 10-17α. Οι δύο συνήθως εργαζόμενοι φτάνουν στο μέτωπο ταξιδεύοντας με τον κλωβό και εξέρχονται στην πλατφόρμα εργασίας. Κάτω από την καλύπτρα προβαίνουν στην απομάκρυνση των χαλαρωμένων τεμαχίων και στη συνέχεια ορύσσουν τα προβλεπόμενα διατρήματα μήκους 2-3 m, για αντίστοιχη προχώρηση. Ακολουθεί η γόμωση και η επιγόμωση, και στη συνέχεια ο κλωβός απομακρύνεται από το μέτωπο σε προστατευμένο χώρο. Ακολουθεί η ανατίναξη, ο αερισμός και στη συνέχεια ο κύκλος των εργασιών επαναλαμβάνεται. Παρακάτω παρατίθενται τα κυριότερα χαρακτηριστικά αυτής της τεχνικής.

- Δίνεται τη δυνατότητα διάνοιξης πολύ μεγάλου μήκους ανιόντων, κατακόρυφων ή κεκλιμένων, ευθύγραμμων ή καμπύλων, γενικά ορθογώνιας διατομής. Ακόμη και σήμερα, η μέθοδος είναι ενδεδειγμένη για τη διάνοιξη τυφλών ανιόντων με αυτά τα χαρακτηριστικά.
- Ο αναρριχητής μπορεί να οδηγηθεί σε ασφαλή θέση κινούμενος πίσω στις σιδηροτροχιές. Οι καμπύλες σιδηροτροχιές παρέχουν επίσης τη δυνατότητα γρήγορης επικοινωνίας μεταξύ του πυθμένα και της πλατφόρμας εργασίας με το ειδικό όχημα εξυπηρέτησης, που είναι έτοιμο όλη την ώρα για λειτουργία κινούμενο στις ράγες.
- Όλες οι εργασίες εκτελούνται στην πλατφόρμα, της οποίας το ύψος και η γωνία προσαρμόζονται εύκολα.
- Οι ορύχοι μετακινούνται εντός του κλωβού κάτω από την πλατφόρμα, τόσον όταν ανεβαίνουν στο μέτωπο, όσον και όταν κατεβαίνουν. Επομένως, κάθε ανοιχτή έκθεση κάτω από το μέτωπο ανατίναξης εξαλείφεται.
- Λόγω της εμφύσησης αέρα και νερού στο μέτωπο μετά τις ανατινάξεις, οι κίνδυνοι από τα αέρια εξαλείφονται και ο χρόνος που απαιτείται για τον εξαερισμό μειώνεται.
- Ένα πρόσθετο στοιχείο επέκτασης μπορεί να συνδεθεί με την πλατφόρμα επιτρέποντας τη διάνοιξη ανιόντων με διατομές έως και 30 m^2. Προκειμένου να διανοιχτεί μια μεγάλη διατομή, μπορούν να χρησιμοποιηθούν, δύο παράλληλοι ή αντικριστοί αναρριχητές.



(α) Μέθοδος Alimak (Tamrock, 1999)

(β) Μέθοδος Jora

Σχήμα 10-17. Ανύψωση τυφλών ανιόντων με αναρριχητές

Η μέθοδος Jora είναι αντίστοιχη με τη μέθοδο Alimak, με τη διαφορά ότι ο αναρριχητής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 10-17β, ανελκύεται με βίντσι. Απαιτείται ως εκ τούτου πιλοτική γεώτρηση μέσω της οποίας διέρχεται το συρματόσχοινο ανέλκυσης. Η μέθοδος χρησιμοποιείται για τη διάνοιξη εσωτερικών φρεάτων ύψους μέχρι 100 m. Από το ανώτερο επίπεδο διανοίγεται από αδαμαντογεωτρύπανο ή κρουστική αερόσφυρα πιλοτική γεώτρηση διαμέτρου 75-100 mm, μέσα από την οποία θα διέλθει το συρματόσχοινο ανέλκυσης του χαλύβδινου κλωβού. Το διάτρημα χρησιμεύει και ως διάτρημα ανακούφισης της ανατίναξης και αερισμού του μετώπου. Ο κλωβός ακινητοποιείται επάνω στα τοιχώματα, και στη συνέχεια διανοίγονται παράλληλα διατρήματα μήκους 2-3 m. Πριν από την ανατίναξη ο κλωβός απομακρύνεται από το φρέαρ και το συρματόσχοινο ανελκύεται μέσα από το διάτρημα.

10.2.2.3 Χρήση διατρητή ανιόντος (raise borer)

Αυτή είναι μια άλλη τεχνική που μπορεί να εφαρμοστεί για τη διάνοιξη μεταξύ δύο επιπέδων, ακόμη και σε σχετικά φτωχό έδαφος. Κατ' 'αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται μια κυκλική διατομή χωρίς ανατινάξεις. Η μηχανή (Σχήμα 10-18) μηχανικής κοπής τοποθετείται στο επάνω επίπεδο και αρχικά διατρά ένα οδηγικό διάτρημα διαμέτρου 229 έως 381 mm από το ανώτερο προς το χαμηλότερο επίπεδο. Στη συνέχεια, τοποθετείται ένα στοιχείο διεύρυνσης μεγάλης διαμέτρου στο κάτω μέρος του φρέατος και το ανυψούμενο φρεζάρεται, μέχρι το ανώτερο επίπεδο, στην επιθυμητή διάμετρο. Η οδηγική οπή παρέχει επίσης πληροφορίες για το είδος των στρωμάτων που θα συναντηθούν και βοηθά στη διάνοιξη του ανιόντος με ακρίβεια. Μπορεί επίσης να υιοθετηθεί η αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή αρχικά να ανορυχθεί το οδηγικό διάτρημα προς τα πάνω από το κατώτερο επίπεδο προς το ανώτερο και στη συνέχεια να διευρυνθεί από το ανώτερο επίπεδο προς το χαμηλότερο, επιλογή που δεν είναι συνήθης.

Διατρητές ανυψούμενων διατίθεται για διάνοιξη τόσον σε μαλακό όσον και σε σκληρό έδαφος για φρέατα διαμέτρου έως 6 m. Μια κατάλληλη μηχανή μπορεί να παρέχει: ταχύτερους ρυθμούς, καλύτερη ασφάλεια για τα συνεργεία όρυξης, και ελάχιστη διαταραχή των στρωμάτων και της δομής τους. Όλοι αυτοί οι παράγοντες οδηγούν τελικά σε εξοικονόμηση κόστους. Με την πάροδο των ετών, οι κατασκευαστές όπως η Robbins έχουν αναπτύξει εξοπλισμό ανύψωσης που έχει επιτύχει ορόσημα, που περιλαμβάνουν: μήκος φρέατος 1000 m, διάμετρο φρέατος 0.6 έως 6 m, και τυφλά ανυψούμενα μήκους 200 m και διαμέτρου 1.8 m.

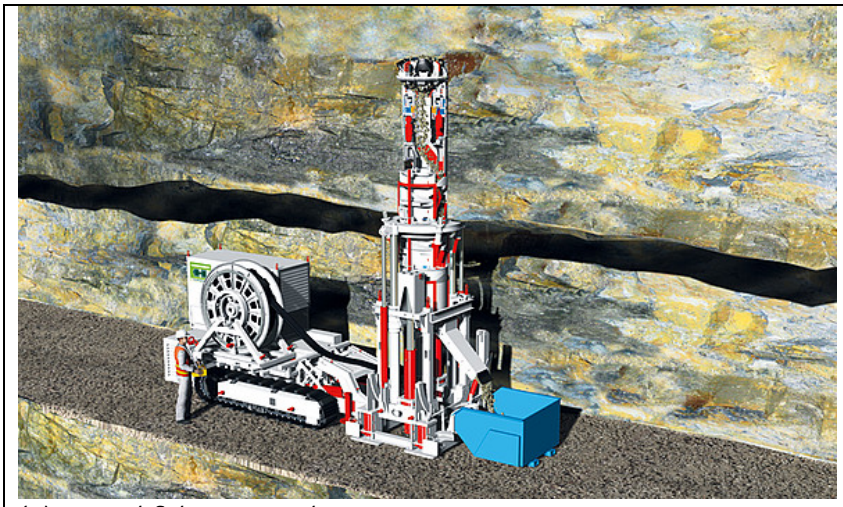


Σχήμα 10-18. Ανύψωση ανιόντος με μηχανική διεύρυνση

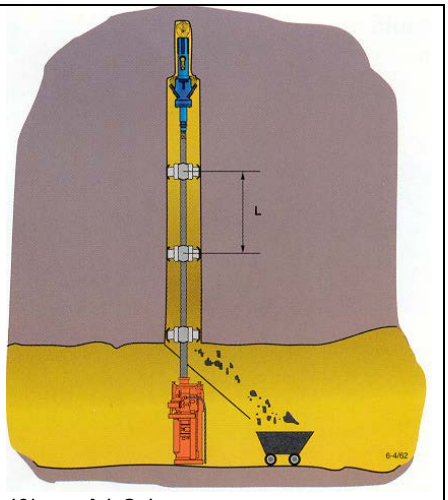
Από την εμφάνιση του πρώτου διατρητή ανυψούμενου, του Robbins 41R, έχουν κατασκευαστεί περισσότερα από 35 διαφορετικά μοντέλα τέτοιων διατρητών από την Atlas Copco-Robbins, που να ταιριάζουν στις ανάγκες πολλών διαφορετικών εφαρμογών. Μοντέλα είναι διαθέσιμα που θα μπορούσαν να ταιριάζουν σε πολλαπλές χρήσεις, όπως καθοδικές διευρύνσεις, ανοδικές τυφλές διατρήσεις και συμβατικές ανυψώσεις. Στην Ευρώπη η Herrenknecht κατασκευάζει μοντέλα όπως το 900VF.

10.2.2.4 Τυφλή διάτρηση ανιόντος.

Εφόσον απαιτείται διάτρηση ανιόντος, χωρίς να υπάρχει πιλοτική γεώτρηση, η μηχανική διάτρηση επιτυγχάνεται με χρήση μηχανών BBM (Σχήμα 10-19α), που διατρούν από υπάρχουσα στοά τυφλά (Σχήμα 10-19β) προς τα πάνω. Με τη μέθοδο αυτή διανοίγονται μικρής διαμέτρου ανιόντα.



(α) Μηχανή διάτρησης ανιόντος BBM,

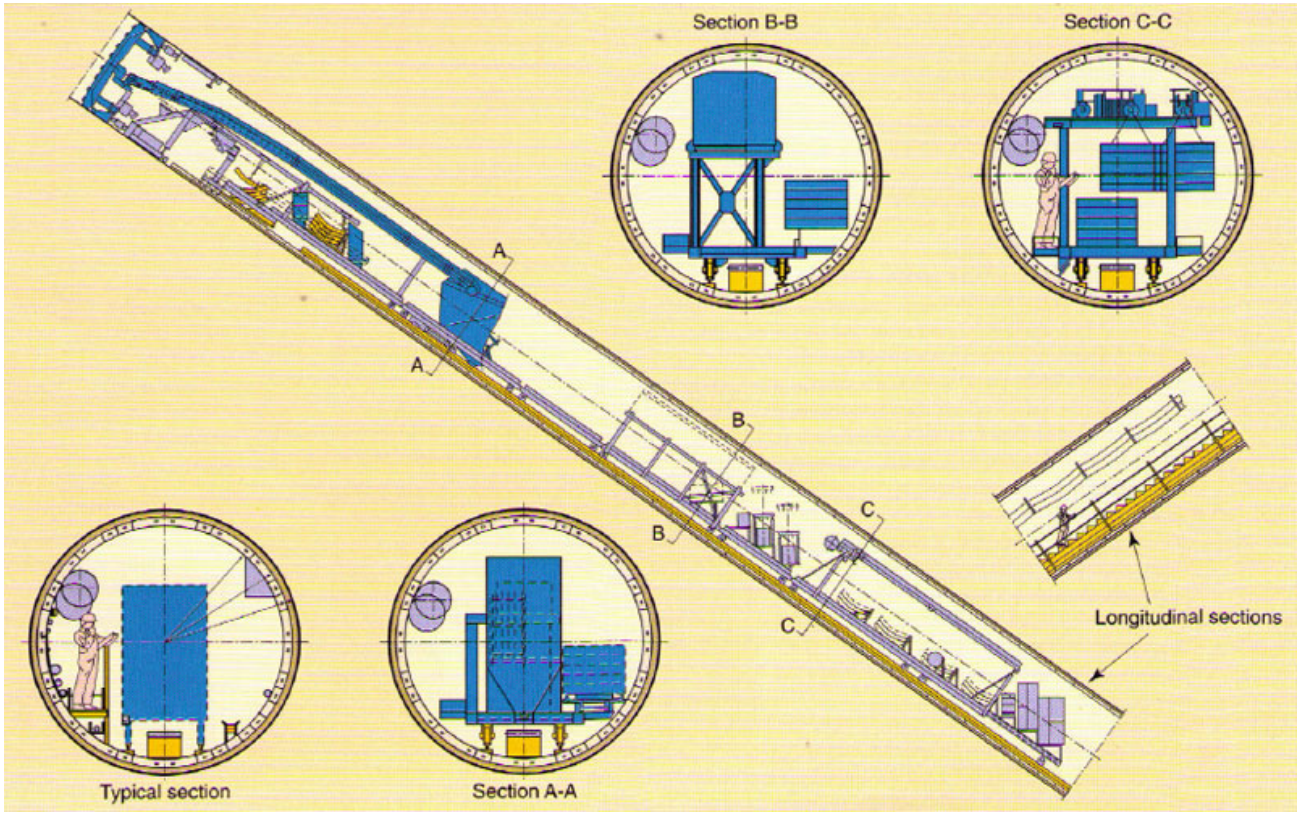


(β) Τυφλή διάτρηση

Σχήμα 10-19. Τυφλή διάτρηση ανιόντος χωρίς πιλοτική γεώτρηση

10.2.2.5 Διάτρηση κεκλιμένων

Κεκλιμένα φρέατα συναντούμε τόσον σε μεταλλεία όσον και σε υδροηλεκτρικά έργα. Η διάνοιξη κεκλιμένων δύναται να πραγματοποιείται από διατρητές εφόσον η απόκλιση από την κατακορυφότητα δεν είναι μεγάλη. Για μεγαλύτερες αποκλίσεις προς την οριζόντια, δύνανται να χρησιμοποιηθούν και ειδικές μηχανές TBM (Σχήμα 10-20). Η Tamrock (1997) προτείνει τη χρήση μιας μονάδας Jumbo (RMHS 205D), με ρυθμιζόμενη πλατφόρμα διάτρησης, που είναι κατάλληλη για τη διάνοιξη ισχυρά κεκλιμένων ανιόντων, με μήκος μέχρι και 150 m.



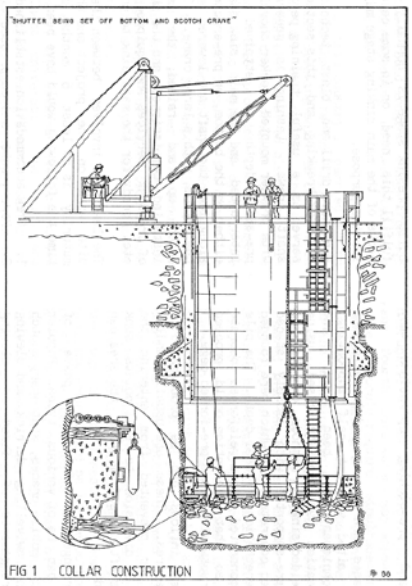
Σχήμα 10-20 Διάνοιξη κεκλιμένου από μηχανή TBM

10.2.3 Κατιόντα

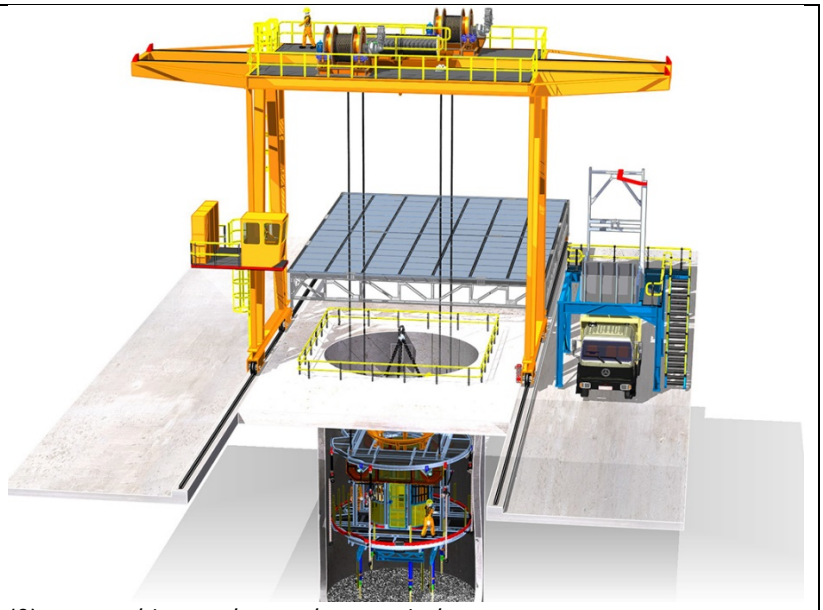
Τα κατιόντα φρέατα βρίσκουν εφαρμογές στην: (i) Εξόρυξη ορυκτών αποθεμάτων, (ii) Προσωρινή αποθήκευση και επεξεργασία λυμάτων, (iii) Βαθιά θεμελίωση γεφυρών και άλλων έργων, και (iv) Σε συνδυασμό με σήραγγα, για (α) ανελκυστήρες, (β) σκάλες, (γ) αερισμό, (δ) μεταφορά υγρών, (ε) αποστράγγιση και άντληση, ιδιαίτερα για υποβρύχιες σήραγγες. Οι λειτουργίες μπορούν να χωριστούν σε τρία τμήματα: (α) άφιξη στο μέτωπο του πετρώματος, (β) βύθιση μέσα στο πέτρωμα, (γ) βύθιση μέσω ασυνήθιστα ή δύσκολης γεωμάζας, εφόσον υπάρχει, χρησιμοποιώντας ειδικές μεθόδους. Μεγάλη σημασία έχει η εκ των προτέρων γνώση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα και της ακριβούς γεωλογικής-πετρογραφικής εικόνας των στρωμάτων, εντός των οποίων θα πραγματοποιηθεί η δια του φρέατος διείσδυση. Προς τούτο είναι απολύτως απαραίτητο να ορυχθεί ειδική γεώτρηση δειγματοληψίας (συνήθως διαμέτρου 50-75 mm) εντός ή σε μικρή σχετικά απόσταση από το φρέαρ (30 – 50 m). Το νερό της γεώτρησης υποβάλλεται σε χημική ανάλυση για εξακρίβωση του χαρακτήρα του.

Κάθε φρέαρ έχει ένα κολάρο από σκυρόδεμα στην επιφάνεια, που (Grieves, 1996) παρέχει έναν άκαμπτο φορέα περίφραξης, επιτρέπει σε βαριούς γερανούς την ανέλκυση μπαζών, υλικών, και προσωπικού, και παρέχει μια σταθερή βάση στήριξης των μονάδων βύθισης του φρέατος. Ο χώρος εντός του κολάρου εκσκάπτεται μέχρι να συναντηθεί βράχος. Το τμήμα αυτό (Σχήμα 10-21α) ονομάζεται προφρέαρ (foreshaft) και εκσκάπτεται στο απαιτούμενο βάθος, 30 έως 50 μέτρα, ή, ενδεχομένως, πιο βαθιά, χρησιμοποιώντας, εφόσον απαιτείται, αερόσφυρες χειρός, φρέζα, ή κλασσικό εκσκαφέα μεθ' αρπάγης, και τα μπάζα φορτώνονται

σε κάδους. Για την κατασκευή του προφρέατος, ένας γερανός (Σχήμα 10-21β), σταθερός ή μετακινούμενος, χρησιμοποιείται για την ανέλκυση των μπαζών, των υλικών, και, ενδεχομένως, του προσωπικού και του εξοπλισμού που απαιτείται για την εκσκαφή και την επένδυση των τοιχωμάτων. Το εξορυσσόμενο προϊόν μεταφέρεται δι' αυτοκινήτων είτε απ' ευθείας είτε μέσω πρόχειρης αποθήκης. Η εισροή υπόγειου νερού μπορεί να δημιουργεί προβλήματα, ιδιαίτερα σε ασταθές έδαφος. Αντιμετωπίζεται είτε με άντληση, ή με ενέσεις από την επιφάνεια, ή με αποστράγγιση από σημειακές πηγές γύρω από το φρέαρ. Σε σοβαρότερες περιπτώσεις, μπορεί να χρειαστεί μόνωση του φρέατος με ψύξη του εδάφους πριν την εκσκαφή. Το προφρέαρ επενδύεται με οπλισμένο σκυρόδεμα μέχρι το στερεό βράχο. Προς τούτο, τοποθετείται το εσωτερικό κυκλικό καλούπι και εκτός αυτού μορφώνεται το εξωτερικό καλούπι. Το κολάρο κατασκευάζεται από δακτύλιο σε δακτύλιο από τη θεμελίωσή του προς την επίγεια επιφάνεια, με έγχυση σκυροδέματος στο χώρο μεταξύ του εσωτερικού κυκλικού καλουπιού και του εξωτερικού καλουπιού. Με την ολοκλήρωση της σκυροδέτησης, το εξωτερικό καλούπι απομακρύνεται, ενώ το εναπομένον εξωτερικό τμήμα της ανοικτής εκσκαφής επιχώνεται. Όταν το έδαφος στο οποίο βρίσκεται το κολάρο δεν είναι ευσταθές, μπορεί να προϋποστηριχτεί με την κατασκευή γειτονικών φρεατοπασσάλων αιχμής από οπλισμένο σκυρόδεμα. Οι κεφαλές των πασσάλων συνδέονται σε κεφαλόδεσμο κυκλική δοκό από οπλισμένο σκυρόδεμα, έτσι ώστε η εκσκαφή που θα ακολουθήσει να πραγματοποιηθεί μέσα σε στατικά ισχυρό δακτύλιο. Με την προβύθιση (presink) παρέχεται επαρκές βάθος που επιτρέπει την εγκατάσταση και θέση σε λειτουργία της μονάδας κύριας βύθισης και εξασφαλίζει ότι οι ανατινάξεις, εφόσον εφαρμόζονται, δεν θα βλάψουν τις θύρες του φρέατος και τη μονάδα πρόσδεσης.



(α) Κατασκευή κολάρου και προφρέατος (Richards, 1989)



(β) Γερανογέφυρα πάνω από το προφρέαρ

Σχήμα 10-21. Προφρέαρ

Μετά την ολοκλήρωση του προφρέατος, και την τοποθέτηση του εξοπλισμού ξεκινά η κύρια βύθιση, η οποία συνεχίζει κανονικά μέχρι και λίγο κάτω από την χαμηλότερη στάθμη του κυρίως φρέατος, ώστε, μεταξύ άλλων, να προσφέρεται χώρος για μια λεκάνη στράγγισης του νερού. Όταν προβλέπεται εισροή νερού σε συγκεκριμένους ορίζοντες, μπορεί να αντιμετωπιστεί με ενέσεις είτε πριν τη βύθιση από την επιφάνεια είτε μέσα από το φρέαρ κατά τη βύθιση. Η επένδυση του φρέατος πέραν του ότι προσδίδει αντοχή, προστατεύει το φρέαρ από εισροή υδάτων. Εισροή νερού πάνω από 40 λίτρα/λεπτό παρεμποδίζει το ρυθμό της βύθισης. Η διαδικασία όρυξης καθορίζεται από τις διαστάσεις, τις επί τόπου γεωλογικές συνθήκες, και τη διαθεσιμότητα ενός υφιστάμενου υπόγειου ανοίγματος, και δύναται να πραγματοποιείται είτε με ανατινάξεις είτε με μηχανική κοπή. Η χρησιμοποίηση ή μη εκρηκτικών υλών δύναται να διαχωρίσει τις μεθόδους όρυξης σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Συνηθέστερα πραγματοποιείται με ανατινάξεις, που προϋποθέτουν τις διαδοχικές φάσεις κυκλικά επαναλαμβανόμενων εργασιών: όρυξη διατρημάτων, γόμωση των διατρημάτων με εκρηκτική ύλη-επιγόμωση-πυροδότηση, αποκόμιση του εξορυσσόμενου προϊόντος, υποστήριξη (προσωρινή ή και μόνιμη) της δημιουργούμενης εκσκαφής. Παράλληλα εξασφαλίζονται: αερισμός και φωτισμός της εκσκαφής, απομάκρυνση των τυχόν υφισταμένων νερών, τοπογραφικός έλεγχος (Οικονομόπουλος, 1989).

Φρέατα που χρησιμοποιούνται για προσωρινή πρόσβαση μόνο, μπορεί να επενδύονται από δακτυλίους δομικού χάλυβα και δομικό πλέγμα ή από κυματοειδή φύλλα. Εναλλακτικά, σε καλής ποιότητας πέτρωμα, το φρέαρ μπορεί να παραμείνει ανεπένδυτο, ή να υποστηριχτεί σποραδικά από αγκύρια όπου χρειάζονται, ή από συστηματικά αγκύρια, δομικό πλέγμα ή / και εκτοξευμένο σκυρόδεμα. Μία επένδυση από σκυρόδεμα παρέχεται συνήθως όπου τοποθετούνται οδηγοί για υψηλής ταχύτητας ανέλκυση και σε φρέατα όπου η ομαλή επένδυση είναι απαραίτητη για τη βελτιστοποίηση της ροής του νερού ή του εξαερισμού. Κανονικά, η επένδυση από σκυρόδεμα τοποθετείται κατά τη διάρκεια της βύθισης σε βήματα 5m ακολουθούσα από κοντά τον εκάστοτε πυθμένα του φρέατος. Για συγκεκριμένες εφαρμογές σε βαθιά φρέατα, χρησιμοποιούνται ολισθαίνοντες μεταλλότυποι , από κάτω προς τα πάνω για την επίτευξη μιας χωρίς αρμούς συνεχούς ομαλής επιφάνειας.

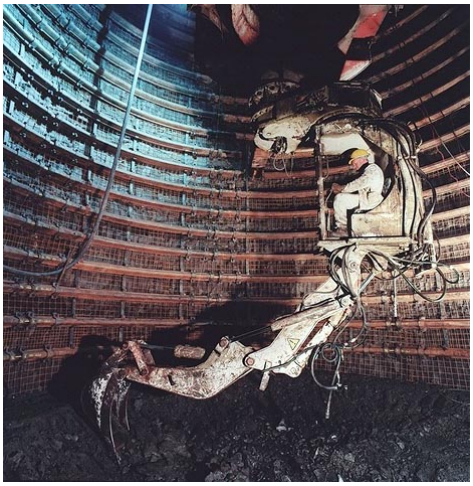
Μέθοδοι ταχείας βύθισης βαθιών φρεάτων απαιτούν αποδεδειγμένα ασφαλή, σύγχρονο και πρακτικό εξοπλισμό. Ένα τέτοιο σύστημα περιλαμβάνει πλαίσιο πολλών επιπέδων (Σχήμα 10-22α) το οποίο εγκαθίσταται όταν ολοκληρωθεί η διάνοιξη στο προβλεπόμενο βάθος, στον πυθμένα του προφρέατος ή συναρμολογείται στην επιφάνεια και κατεβαίνει στον πυθμένα με γερανό. Στο Σχήμα 10-22β δίνεται σύστημα συμβατικής εξόρυξης με διάτρηση-ανατίναξη και στο Σχήμα 10-22γ δίνεται σύστημα εξόρυξης με εκσκαπτικό μέσο, που αναρτώνται από το πολυεπίπεδο πλαίσιο.



(α) Συμβατικό σύστημα διάνοιξης που περιλαμβάνει πλαίσιο με πατώματα



(β) Διατρητικά στελέχη



(γ) Τσάπα φρέατος

Σχήμα 10-22. Εξοπλισμός διάνοιξης φρέατος.

10.2.3.1 Διάτρηση - Ανατίναξη

Παραδοσιακά, τα βαθιά φρέατα σε σκληρά πετρώματα εκσκάπτονται με τη μέθοδο «διάτρηση – ανατίναξη» (Σχήμα 10-23), μια μέθοδο που δεν άλλαξε σημαντικά έως τώρα. Κατά τις τρεις τελευταίες δεκαετίες, η επιλεκτική χρήση φορείων διάτρησης φρεάτων για την αντικατάσταση χειρωνακτικών διατρητικών βύθισης, επέτρεψε βαθύτερα βήματα με μεγαλύτερη ακρίβεια διάτρησης και βελτίωση της παραγωγικότητας. Παρακάτω δίνεται ο κύκλος διάνοιξης.

10.2.3.1.1 Διάτρηση

Η όρυξη διατρημάτων διενεργείται δι’ αεροσφυρών διαφόρων τύπων (Μούσουλος, 1959), επιλεγόμενων βάσει των αντιμετωπιζομένων συνθηκών. Χρησιμοποιείται εξοπλισμός (sinkers) για ανόρυξη διατρημάτων διαμέτρου 32-38 mm ή jumbo εξοπλισμένο με δύο έως τέσσερις βραχίονες για ανόρυξη διατρημάτων διαμέτρου 40-55 mm. Το μήκος των διατρημάτων κυμαίνεται από 1.5 έως 3 m για τα πρώτα, και έως και 5 μέτρα για τα δεύτερα. Οι συνηθέστερες πρότυπες διατάξεις κοπής είναι οι σφήνας ή πυραμίδας, τμηματική βαθμίδας ή σπείρας και παράλληλης ή κυκλικής με κενό διάτρημα ανακούφισης στο κέντρο (Τσουτρέλης, 2001). Η κοπή σφήνας εφαρμόζεται στα ορθογώνια φρέατα ενώ η κοπή πυραμίδας στα κυκλικά. Οι κοπές αυτές τείνουν να αντικατασταθούν από τις παράλληλες με διατρήματα που φτάνουν τα 5 m μήκος. Τμηματική κοπή υιοθετείται όταν το νερό είναι ψηλά και το φρέαρ έχει μεγάλη διατομή, έτσι ώστε το μέτωπο να μπορεί να χωριστεί σε δύο

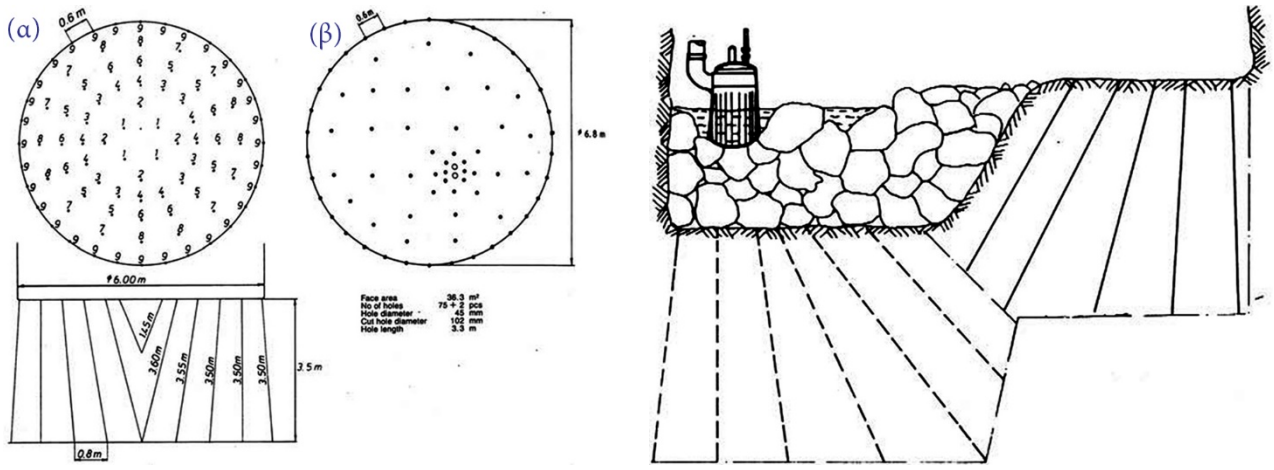
τμήματα που να επιτρέπουν τη συνεχή απάντληση. Ο αριθμός των διατρημάτων σε μια διάταξη είναι συνάρτηση της διαμέτρου του διατρήματος, της διαμέτρου του φρέατος και του τύπου των στρωμάτων. Το όλο σύστημα διάτρησης μετακινείται προς τα κάτω, μόλις τα διατρητικά δεν μπορούν να φτάσουν τον πυθμένα, το οποίο συμβαίνει κάθε 2 ή 3 γύρους (Tamrock, 1997). Εφόσον για τις ανορύξεις χρησιμοποιείται συγκρότημα πολλαπλών σφυρών (shaft jumbo), μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω τύποι για τον προσδιορισμό του αριθμού των διατρημάτων διαμέτρου 45-55 mm (Tatiya, 2005):

$$N = 2.55 \cdot A[m^2] + 22$$

(10-1)

10.2.3.1.2 Ανατίναξη

Στην πράξη, ο πυθμένας του φρέατος κατά τη διάρκεια της βύθισης είναι συνήθως γεμάτος με νερό· συνεπώς, χρησιμοποιούνται εκρηκτικά υψηλής-πυκνότητας ανθεκτικά στο νερό, όπως με βάση τη νιτρογλυκερίνη. Ως υλικό του πώματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί μίγμα νερού ή άμμου με άργιλο. Συνήθως, σειρές από παράλληλες συνδέσεις συνδέουν τους πυροκροτητές στο μέτωπο και αυτό το κύκλωμα συνδέεται με το καλώδιο ανατίναξης που κρέμεται στον φρέαρ και οδηγεί μέχρι την επίγεια επιφάνεια. Το μέτωπο ανατινάζεται αφού ληφθούν οι κατάλληλες προφυλάξεις. Σε ορισμένα από τα φρέατα στη Νότια Αφρική έχουν χρησιμοποιηθεί, με μεγάλη επιτυχία και ελπιδοφόρο μέλλον, εκρηκτικές γέλες νερού με βάση το αλουμίνιο και υψηλής συχνότητας ηλεκτρομαγνητικής έναυσης πυροκροτητές. Η τελευταία εξέλιξη, όπως ισχυρίζεται η Nitro Nobel, είναι η χρήση εκρηκτικού γαλακτώματος (Τσουτρέλης, 1997) με ενισχυτικό και πυροκροτητές Nonel. Υδραυλικά δράπανα ανορύσσουν διατρήματα διαμέτρου 50 mm με ένα κενό διάτρημα διαμέτρου 200 mm σε μία διάταξη κυλινδρικής κοπής. Έχει πραγματοποιηθεί, με επιτυχία, βήμα κοπής βάθους 5 m.



(α) Προεκσκαφή: (α) πυραμίδας & (β)παράλληλη (β) Βαθμιδωτή εκσκαφή

Σχήμα 10-23. Συμβατικές μέθοδοι διάνοιξης με ανατινάξεις (Tamrock, 1997).

10.2.3.1.3 Φόρτωση και αποκόμιση

Η παρουσία ύδατος, ο περιορισμένος χώρος και χρόνος που απαιτείται για την εγκατάσταση του εξοπλισμού ξεμπαζώματος, καθιστά αυτή τη δραστηριότητα χρονοβόρα. Καταλαμβάνει περίπου 50-60% του χρόνου ενός κύκλου βύθισης. Η αποτελεσματικότητα του ξεμπαζώματος εξαρτάται από το μέγεθος των θραυσμάτων πετρώματος, το βάθος ανέλκυσης, τη διατομή του φρέατος και το ρυθμό εισροής νερού. Οι συνηθέστερες μονάδες ξεμπαζώματος είναι φορτωτές με βραχίονες, όπως: Cryderman, αρπάγη, κλπ.

10.2.3.1.4 Υποστήριξη ή επένδυση του φρέατος

Υπάρχουν δύο τύποι επένδυσης, η προσωρινή και η μόνιμη. Ο τύπος του ύδατος και της αντοχής των στρωμάτων μέσω των οποίων πραγματοποιείται η βύθιση, διέπουν την επιλογή. Σε ορισμένες περιπτώσεις δεν απαιτείται προσωρινή υποστήριξη, ενώ σε άλλες καθίσταται απαραίτητη η προστασία του προσωπικού και του εξοπλισμού από οποιαδήποτε πλευρική πτώση. Ανάλογα με τις συνθήκες, το μήκος της προσωρινής στήριξης μπορεί να κυμαίνεται από 6 έως 40 m. Μόλις καλυφθεί αυτό το μήκος από την προσωρινή επένδυση και πριν συνεχιστεί η προχώρηση περαιτέρω, εγκαθίσταται η μόνιμη επένδυση. Πριν από την εγκατάσταση της μόνιμης

επένδυσης, η προσωρινή επένδυση, εάν είναι εφικτό, μπορεί είτε να αφαιρεθεί είτε να παραμείνει στη θέση της. Η σύγχρονη πρακτική κατασκευής μόνιμης επένδυσης εφαρμόζει έγχυτο σκυρόδεμα επιθυμητής αντοχής. Η χρήση χαλύβδινων στοιχείων χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τις μεθόδους βύθισης με κατάψυξη.

10.2.3.1.5 Επικουρικές δράσεις

Απάντληση υδάτων
Κατά τη βύθιση, μόλις το φρέαρ φτάσει τον υδροφόρο ορίζοντα και πέρα από αυτόν, η εισροή νερού είναι αναπόφευκτη. Θα πρέπει να γίνει διευθέτηση, ανάλογα με το ρυθμό της εισροής, για την αντιμετώπισή της. Οι σύγχρονες πρακτικές κάνουν χρήση αντλιών μετώπου ή καταβύθισης.
Αντλίες μετώπου: Εάν η εισροή νερού είναι περιορισμένη, αυτό μπορεί να ανελκυστεί χρησιμοποιώντας κάδους ή βαρέλια νερού. Το γέμισμά τους επιτυγχάνεται από πνευματικά λειτουργούσες αντλίες μεμβρανών, που μπορούν να αντιμετωπίσουν λασπώδη και βρώμικα νερά.
Αντλίες καταβύθισης: Εάν το η εισροή νερού είναι πέρα από την ικανότητα διαχείρισης από τις αντλίες μετώπου, τότε χρησιμοποιούνται κρεμάμενες αντλίες οι οποίες μπορούν να αναρτηθούν στο φρέαρ μαζί με τα ηλεκτρικά καλώδια, τον κινητήρα, την αναρρόφηση και τις παροχές. Οι αντλίες που χρησιμοποιούνται είναι τύπου τουρμπίνας στις οποίες μπορούν να προστεθούν πτερωτές όσο το πιεζομετρικό ύψος αυξάνεται. Ρύθμιση της βαλβίδας παροχής μπορεί επίσης να ρυθμίσει την ποσότητα.
Πρόβλεψη για ενδιάμεσο φρεάτιο και αντλίες: Όταν το βάθος του φρέατος αυξάνεται και η εισροή νερού είναι σημαντική, είναι πάντα προτιμότερο να έχουμε ενδιάμεσους θαλάμους άντλησης με λεκάνες σε διαστήματα που δεν υπερβαίνουν τα 250 m.

Εξαερισμός
Ο φρέσκος αέρας που παρέχεται από έναν φυσητικό ανεμιστήρα εγκατεστημένο στην επίγεια επιφάνεια φθάνει στο μέτωπο μέσω άκαμπτων και εύκαμπτων αγωγών που αναρτώνται στα πλευρά του φρέατος. Η σειρά των άκαμπτων αγωγών εξαερισμού τελειώνει τουλάχιστον 6 m πάνω από το βυθό του φρέατος για να αποφεύγονται ζημιές από τις ανατινάξεις. Στη συνέχεια, για να υπάρχει καθαρός αέρας στο μέτωπο, ο εύκαμπτος αγωγός συνδέεται με τον άκαμπτο. Ολόκληρο το φρέαρ (εξαιρουμένου του άκαμπτου αγωγού) λειτουργεί ως επιστροφή. Σε πολλές βυθίσεις φρεάτων σήμερα, η πρακτική είναι να εγκαθίσταται έναν ανεμιστήρα με δυνατότητα αντίθετης περιστροφής, έτσι ώστε αμέσως μετά την ανατίναξη να ενεργοποιηθεί για να λειτουργήσει ως μυζητικός, και μόλις οι καπνοί καθαρίσουν, να ξαναλειτουργήσει ως φυσητικός. Επαρκής ποσότητα αέρα απαιτείται για την αερισμό του μετώπου.

Φωτισμός
Ένα φως, που αποτελείται από ένα σύμπλεγμα 4-6 βολβών στερεωμένων σε κατάλληλο υδατοστεγές εξάρτημα, χρησιμοποιείται για την παροχή φωτισμού στο μέτωπο εργασίας κατά τη διάρκεια της διάτρησης, του ξεμπαζώματος, της επένδυσης και άλλων λειτουργιών.
Άξονας κεντραρίσματος: Χρησιμοποιώντας τα σημεία αναφοράς, τα οποία έχουν στερεωθεί πριν ξεκινήσει η βύθιση για τον καθορισμό του κέντρου του φρέατος, το κέντρο και κλίση του φρέατος ελέγχονται από καιρό σε καιρό, με τη χρήση μιας συσκευής κεντραρίσματος που είναι εγκατεστημένη στην επίγεια επιφάνεια.

10.2.3.2 Μέθοδοι μηχανικής κοπής

Οι συνήθεις μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι η περιστροφική διάτρηση, η διάτρηση από μηχανή, και η διεύρυνση ανιόντων.

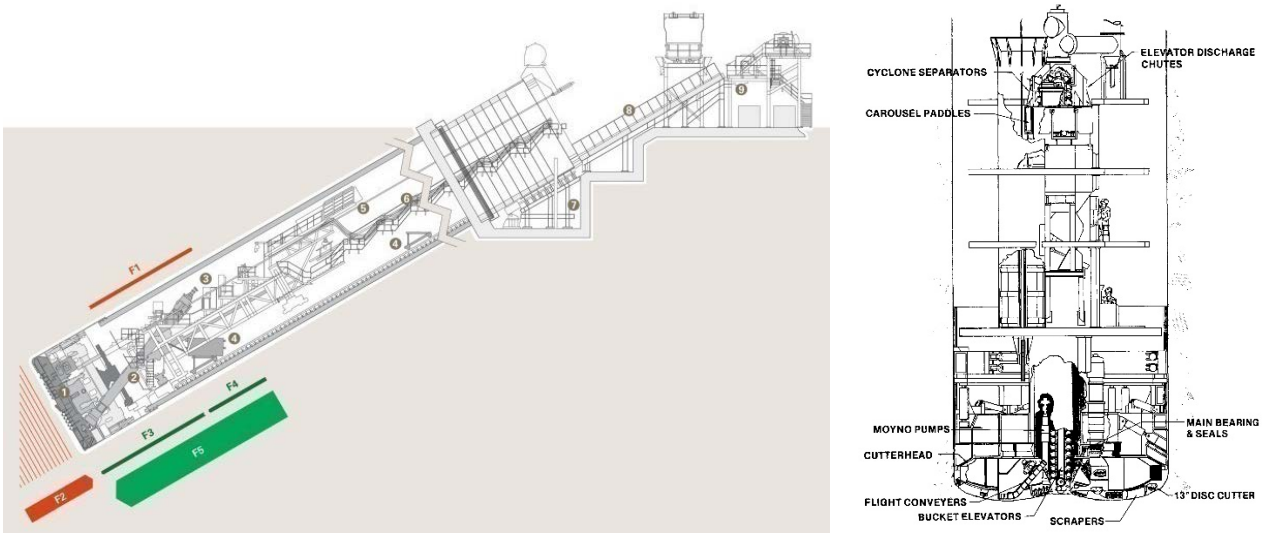
10.2.3.2.1 Περιστροφική διάτρηση του φρέατος

Η χρήση περιστροφικών γεωτρήσεων έχει εφαρμοστεί εκτενώς για τη βύθιση πηγαδιών φυσικού αερίου και πετρελαίου. Η ίδια τεχνική έχει εφαρμοστεί και στη βύθιση φρεάτων, ιδιαίτερα μέσω υδροφορέων ή κατακρημνιζόμενων σχηματισμών, που καθιστούν το συμβατικές τεχνικές βύθισης φρεάτων (συμπεριλαμβανομένων των ειδικών μεθόδων) οικονομικά ανέφικτες. Βασικά, η τεχνική αυτή εφαρμόζεται προκειμένου να ανορύξει διατρήματα μεγάλης διαμέτρου στην περιοχή του 1.5-8 m και μέχρι βάθους 2000 m περίπου (Tatiya, 2005). Συνήθως, μπορούν να βυθιστούν, αεραγωγοί και φρέατα διαφυγής έκτακτης ανάγκης,

χρησιμοποιώντας αυτή την τεχνική, αλλά σε εξαιρετικές περιπτώσεις έχουν επίσης βυθιστεί κύρια φρέατα. Η μέθοδος έχει πλεονεκτήματα, όπως η εκτέλεση όλων των λειτουργιών από την επιφάνεια και η αποτελεσματική αντιμετώπιση των υπόγειων υδάτων, κατακρημνίσεων, και μαλακών σχηματισμών. Επιτυγχάνεται μια λεία επιφάνεια τοιχώματος με γρήγορους ρυθμούς διείσδυσης, και με λιγότερη απασχόληση εργατών. Μερικοί από τους περιορισμούς της είναι το υψηλό κόστος κεφαλαίου και οι δυσκολίες στη διάνοιξη των σκληρότερων στρωμάτων.

10.2.3.2.2 Διάτρηση κατιόντος με μηχανική κοπή

Η διάτρηση φρεάτων με κοπή του πετρώματος επιτυγχάνεται από μηχανές διαφόρων τύπων. Εισήχθησαν τη δεκαετία του 1960, και αρχικά δεν κέρδισαν μεγάλη αποδοχή λόγω του γεγονότος ότι κάθε δύσκολο έδαφος, μέσω του οποίου θα διανοίγονταν το φρέαρ, θα έπρεπε πρώτα να υποστεί επεξεργασία ή να στερεοποιηθεί. Δεύτερον, η απομάκρυνση του μεγάλου όγκου μπαζών τα οποία, χωρίς μια οπή οδηγό που θα τα οδηγούσε σε κατώτερο επίπεδο προσπέλασης, ήταν μια κοπιαστική δράση. Στο Σχήμα 10-24α, φαίνεται παραλλαγή των TBM για τη διάνοιξη κατιόντος κεκλιμένου και στο Σχήμα 10-24β για τη διάνοιξη κατακόρυφου κατιόντος.

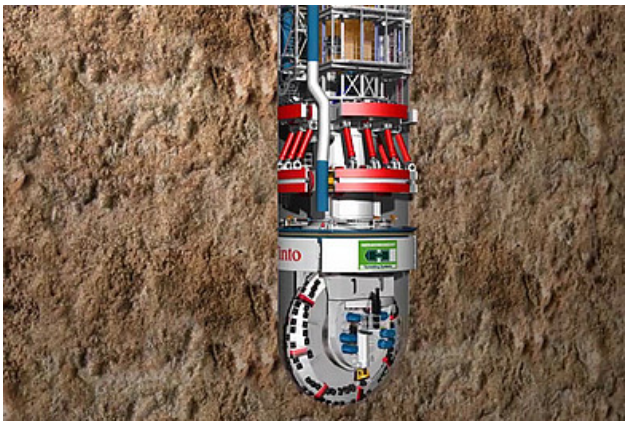


(α) Διάνοιξη κεκλιμένου (β) Διάνοιξη κατακόρυφου

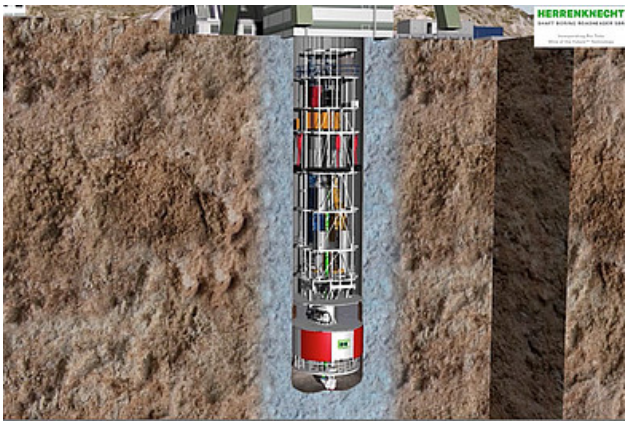
Σχήμα 10-24. Μηχανή TBM για τη διάνοιξη κατιόντος

Σήμερα διατίθενται διάφοροι νέοι τύποι μηχανών, που ξεπερνούν δυσκολίες των προηγουμένων. Το SBM (Σχήμα 10-25α) είναι μια εξέλιξη για την μηχανική εκσκαφή βαθιών κατακόρυφων τυφλών φρεάτων σε συνθήκες σκληρού βράχου. Διαθέτει έναν τροχό κοπής, με διάμετρο ίση με του φρέατος, τοποθετημένο σε ένα φορείο. Το φορείο είναι τοποθετημένο σε δομή που περιστρέφεται γύρω από τον κατακόρυφο άξονα του φρέατος. Πέδιλα ωστήρες χρησιμοποιούνται για την πάκτωση της μηχανής στο φρέαρ. Η διαδικασία εκσκαφής είναι μια διαδικασία δύο σταδίων για ένα πλήρες βήμα. Στο πρώτο εκσκάπτεται τάφρος στο βάθος ενός βήματος με τον τροχό κοπής να περιστρέφεται γύρω από τον οριζόντιο άξονά του και να ωθείται προς τα κάτω στην κατεύθυνση του φρέατος. Στο δεύτερο εκσκάπτεται ολόκληρο το βήμα εκσκαφής περιστρέφοντας τον τροχό κοπής κατά 180° γύρω από τον κατακόρυφο άξονα του φρέατος. Διακρίνονται τρεις περιοχές της μηχανής, από κάτω προς τα πάνω: (α) Η περιοχή του θαλάμου κοπής, του αποκονιωτή και διερευνητικών γεωτρήσεων, (β) η περιοχή τοποθέτησης ήλων, και (γ) η περιοχή των ωστήρων και του συστήματος αποκόμισης. Τα μπάζα του πετρώματος πέφτουν σε μια χοάνη, η οποία τα εκκενώνει σε κάδους για την απόρριψή τους στην επίγεια επιφάνεια. Το SBM περιλαμβάνει τις εγκαταστάσεις επένδυσης και εξοπλισμού του φρέατος, δέσμη λέιζερ και μηχανικές διατάξεις ελέγχου κατεύθυνσης, συστήματα υποστήριξης, συστήματα διαχείρισης νερού και αερισμού και απλοποιημένη πρόσβαση στα κοπτικά για αλλαγές και συντήρηση. Πλεονεκτήματα της μηχανής είναι (α) Υψηλή ταχύτητα βύθισης, (β) Υψηλό επίπεδο ασφάλειας, (γ) Ενσωματωμένο σύστημα εκσκαφής, αποκόμισης μπαζών, και στήριξης πετρώματος. (δ) Εύκολα προσπελάσιμο μέτωπο. (ε) Ειδικά γεωτρύπανα για γεωλογική διερεύνηση και ενεμάτωση. (ς) Σύστημα ημι-μερικής εκσκαφής με πρότυπους βιομηχανικούς κοπτικούς δίσκους.

Παραλλαγή της μηχανής SBM είναι ο τύπος SBR που αντί για τροχό διαθέτει φρέζα χειριζόμενη από βραχίονα.

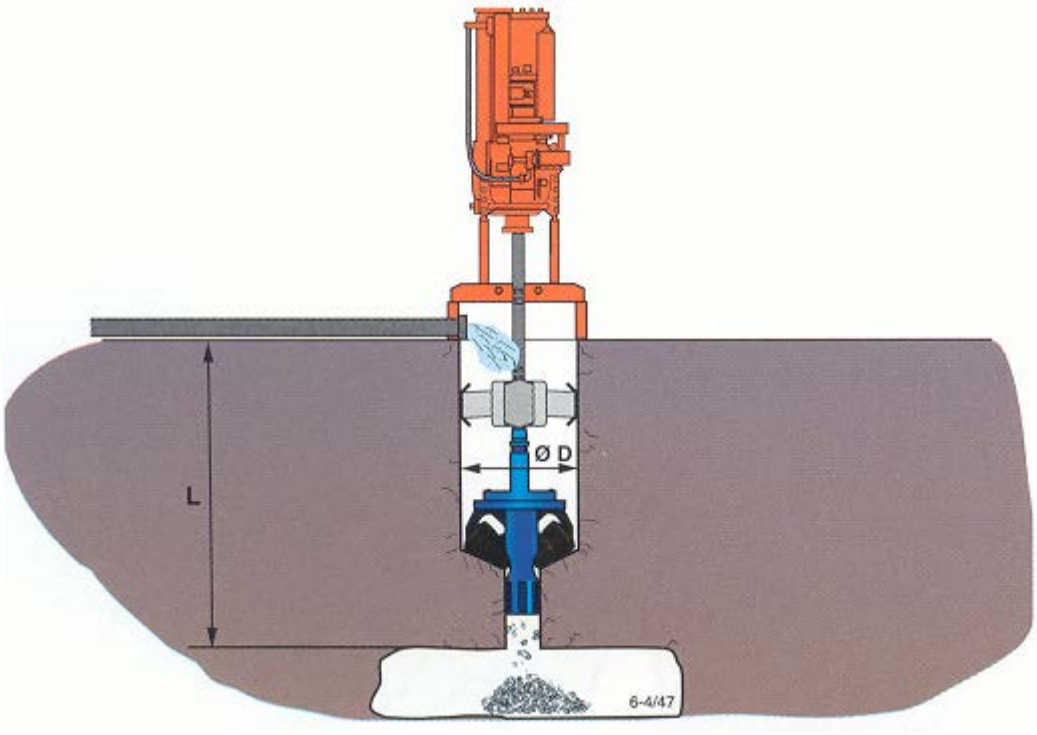


(α) Εξόρυξη με κοπτικό τροχό (SBM)



(β) Εξόρυξη με φρέζα (SBR)

Σχήμα 10-25. Μηχανές διάτρησης φρεάτων



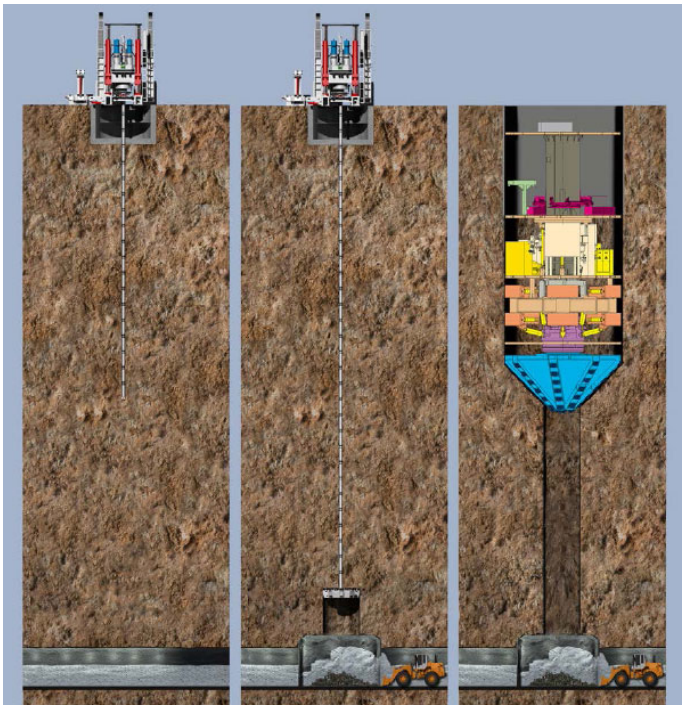
Σχήμα 10-26. Χρήση διανοιγμένου ανιόντος

10.2.3.2.3 Μέθοδοι διεύρυνσης ανιόντων

Εφόσον το χαμηλότερο επίπεδο που στοχεύει να φτάσει το κατιόν είναι προσβάσιμο, μπορούν να εφαρμοστούν μέθοδοι που χρησιμοποιούν οδηγητικές γεωτρήσεις προς το προσβάσιμο υπάρχον υπόγειο άνοιγμα. Προς τούτο διανοίγεται ανιόν μικρότερης διαμέτρου και στη συνέχεια διευρύνεται με κατιούσα διάνοιξη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 10-26 με απομάκρυνση των μπαζών μέσω του ανιόντος προς το κατώτερο επίπεδο. Οι μέθοδοι αυτές αντιμετωπίζουν το γενικό μειονέκτημα των κατιόντων στο ξεμπάζωμα.

Μια καινοτομία στην τεχνική αυτή είναι το σύστημα γνωστό ως "V" mole (Σχήμα 10-27α). Ο εξοπλισμός αποτελείται από την κοπτική κεφαλή, το σύστημα προχώρησης, τους κυλίνδρους ώσης και κατεύθυνσης, τον κεντρικό άξονα, σύστημα πέδιλων και πλατφόρμα εργασίας. Αρχικά διανοίγεται ανιόν οδηγικό διάτρημα περίπου 1.2 m στο κέντρο του σκοπούμενου φρέατος, από διατρητή φρέατος. Αυτό το οδηγικό διάτρημα παρέχει πληροφορίες σχετικά με το είδος των στρώσεων που θα απαντηθούν και την ευκολία στην επακόλουθη διεύρυνση. Στη συνέχει το ανιόν διευρύνεται με κατιούσα φορά, και τα μπάζα απομακρύνονται μέσω του ανιόντος, στο κατώτερο επίπεδο. Στην τεχνική αυτή διατηρείται η ακριβής κατακορυφότητα του φρέατος. Άμεση επένδυση είναι δυνατή σε ασταθές έδαφος με τη χρήση της πλατφόρμας ακριβώς πάνω από την εγκατάσταση του μηχανήματος. Τα μπάζα που παράγονται διέρχονται μέσω του

οδηγικού διατρήματος. Είναι μέθοδος γρήγορη, πολύ αποτελεσματική, και χωρίς δονήσεις. Αντίστοιχη μέθοδος που κάνει χρήση οδηγικού διατρήματος, αλλά εξορύσσει το πέτρωμα με φρέζα φαίνεται στο Σχήμα 10-27β.



(α) το σύστημα V-mole



(β) Σύστημα φρέζας

Σχήμα 10-27. Διάνοιξη φρέατος με διεύρυνση ανιόντος.

Βιβλιογραφία

Ανδρέου Β (2004). «Φρέατα του Μετρό της Αθήνας», Διπλωματική εργασία, Σχολή ΜΜΜ, ΕΜΠ.

Grieves M (1996) "Deep Shafts" Ch. 10 in Bickel JO, Kuesel TR, King EH (1996). "Tunnel Engineering Handbook", Chapman & Hall, ITP.

Jenny RJ. (1996) " Shafts" Ch. 9 in Bickel JO, Kuesel TR, King EH (1996). "Tunnel Engineering Handbook", Chapman & Hall, ITP.

Hustrulid WA & Bullock RL (2001). "Underground Mining Methods, Engineering Fundamentals and International Case Studies", SME

Μούσουλος Λ (1959). «Εξόρυξις των πετρωμάτων, Τόμος Ι. 'Εκρηκτικαί ύλαι – Όρυξις των διατρημάτων'», Αθήνα.

Μούσουλος Λ (1960). «Εξόρυξις των πετρωμάτων, Τόμος ΙΙ. 'Εξοπλισμός Εκσκαφής-Φορτώσεως-Αποκομίσεως, Τεχνική της εξορύξεως'», Αθήνα.

Οικονομόπουλος Ι (1989). «Εκμετάλλευσις Μεταλλείων-'Προσπέλασις, Κατασκευή κύριων μεταλλευτικών έργων, Ανάπτυξις'», Αθήνα.

Richards LR ed. (1989). "Shaft Engineering", IMM

Tamrock (1997). "Underground Drilling and Loading Handbook", ed. Puhakka T, Tamrock, Tampere, Finland.

Tamrock (1999). "Rock Excavation Handbook for civil Engineering", ed. Heinio M, Tamrock-Sandvik, Finland.

Tatiya R (2005). "Civil Excavations and Tunnelling – a practical guide", Thomas Telford.

Τσουτρέλης Χ (1997). «Εκρηκτικές ύλες και τεχνική των ανατινάξεων, Τόμος 1ος 'Εκρηκτικές ύλες'», Πανεπιστημιακές εκδόσεις ΕΜΠ.

Τσουτρέλης Χ (2001). «Εκρηκτικές ύλες και τεχνική των ανατινάξεων, Τόμος 2ος 'Τεχνική των ανατινάξεων'»

Xanthakos PP (1979). "Slurry Trench Walls", McGraw Hill, NY.

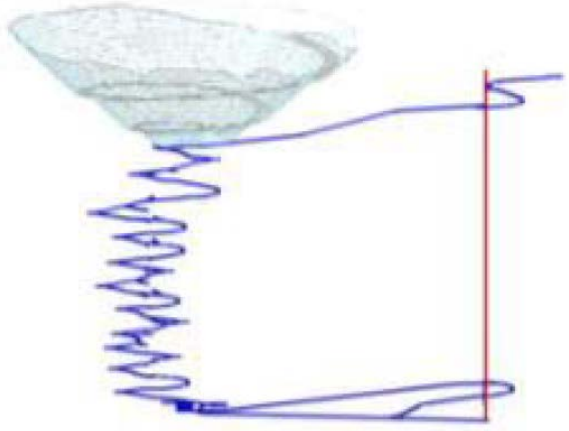
Κριτήρια αξιολόγησης

Κριτήριο αξιολόγησης 1.

(α) Σχεδιάστε κατακόρυφη τομή του φρέατος Κνωσού, του Αττικό Μετρό. (β) Δώστε τη μέθοδο κατασκευής, και (γ) τα μέτρα άμεσης και μόνιμης αντιστήριξης. (δ) Εκτιμήστε προσεγγιστικά τα δρώντα φορτία. (ε) Επιλέξτε τον απαιτούμενο μηχανολογικό εξοπλισμό.

Κριτήριο αξιολόγησης 2.

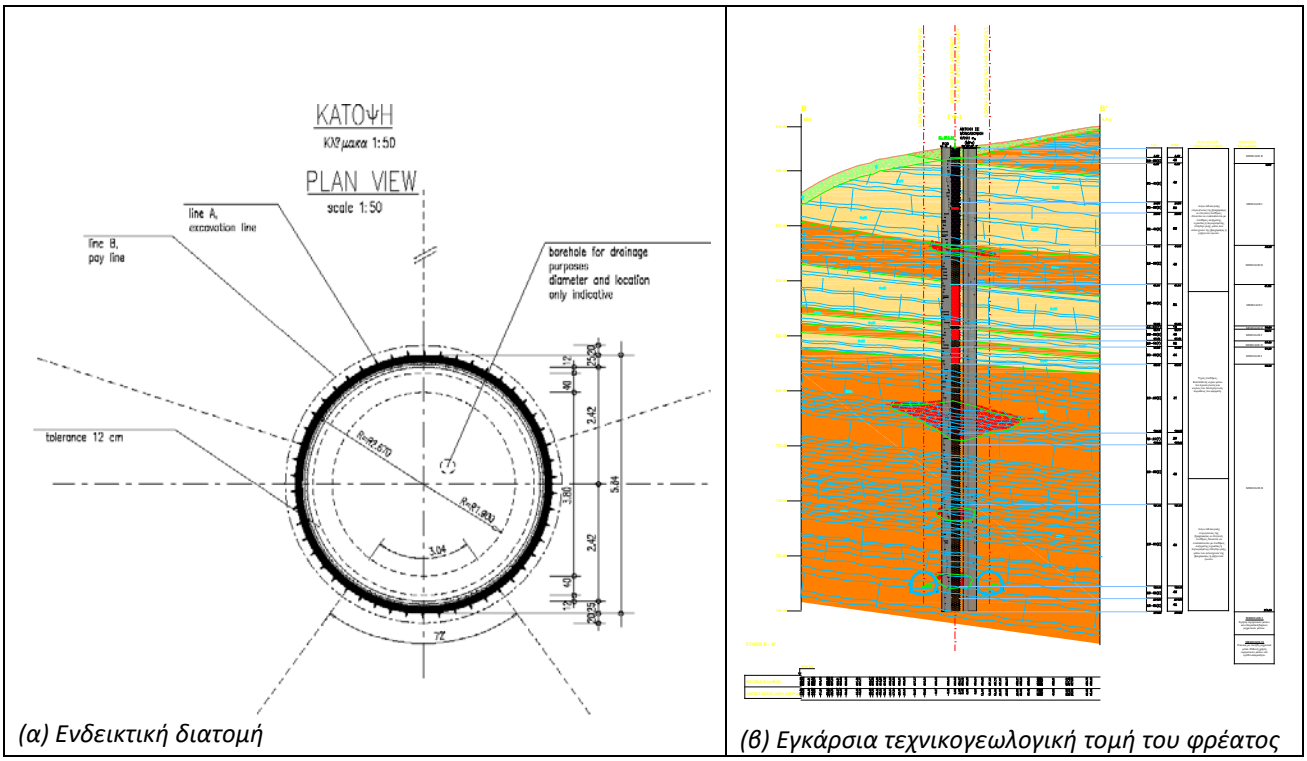
Το βαθύ κύριο φρέαρ του υπόγειου μεταλλείου Σκουριών φθάνει σε τελικό βάθος 720m, έχει μήκος 690m και ωφέλιμη διάμετρο 6m (ωφέλιμη διατομή 28m^2). Η διάνοιξη θα πραγματοποιηθεί μέσα σε βιοτιτικούς χλωριτικούς σχιστόλιθους, και θα συναντηθούν υπόγεια νερά. Η μέθοδος διάνοιξης θα είναι συμβατική (Conventional Shaft Sinking) (α) Σχεδιάστε κατακόρυφη τομή του φρέατος, (β) Περιγράψτε τη μέθοδο εξόρυξης. (γ) Εκτιμήστε τα μέτρα άμεσης και μόνιμης αντιστήριξης. (δ) Επιλέξτε τον απαιτούμενο μηχανολογικό εξοπλισμό.



Σχήμα 10-28. Υπόγειο μεταλλείο Σκουριών:
Ελικοειδές κεκλιμένο – Φρέαρ πρόσβασης – Όρυγμα επιφανειακής εκμετάλλευσης.
Εργοδότης: Ελληνικός Χρυσός ΑΕ
Μελέτη: Όμικρον Κάππα Μελετητική

Θέμα. Φρέαρ Σήραγγας Δρίσκου

Η δίδυμη οδική σήραγγα του Δρίσκου εντάσσεται στο τμήμα της Εγνατίας Οδού από το Δροσοχώρι έως τον Ποταμό Άραχθο και πιο συγκεκριμένα από τη Χ.Θ. 6+ 166,06 έως τη Χ.Θ. 10+ 730,00 ως προς τη χιλιομέτρηση του αριστερού κλάδου. Για λόγους αερισμού της σήραγγας, απαιτείται η κατασκευή ενός φρέατος (Σχήμα 10-29) ο άξονας του οποίου τοποθετείται μεταξύ των δύο κλάδων της σήραγγας και στη Χ.Θ. 8+250 ως προς τη χιλιομέτρηση του αριστερού κλάδου, συνολικού βάθους 210m. Η θέση κατασκευής του φρέατος τοποθετείται ανατολικά της πόλης των Ιωαννίνων και περί τα 200μ νοτιοανατολικά της Εθνικής Οδού Ιωαννίνων – Τρικάλων, μετά τον οικισμό Μάζια.
Το ανάγλυφο στην περιοχή κατασκευής του φρέατος αερισμού χαρακτηρίζεται ορεινό με υψόμετρο 910μ – 920μ. Το τοπογραφικό ανάγλυφο είναι έντονο έως πολύ έντονο. Το υδρογραφικό δίκτυο της ευρύτερης περιοχής είναι πυκνό και αποτελείται από βαθιά ρέματα, κάποια από τα οποία τέμνουν τη ζώνη διέλευσης των σηράγγων στην περιοχή κατασκευής του φρέατος σχεδόν εγκάρσια. Τα ρέματα αυτά εντοπίζονται ΔΒΔ, ΒΒΑ και Ν της θέσης κατασκευής του φρέατος και αποτελούν τους φυσικούς αποδέκτες της επιφανειακής απορροής στην περιοχή. Η περιοχή κατασκευής του φρέατος αερισμού τοποθετείται πλησίον του υδροκρίτη με γενική διεύθυνση ΒΔ – ΝΑ που υπάρχει στην περιοχή και χωρίζει τις λεκάνες απορροής του υδρογραφικού δικτύου.
Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά στην ανάπτυξη των ρεμάτων στην περιοχή του φρέατος, τα οποία ανήκουν στην ίδια λεκάνη απορροής με τη θέση κατασκευής, σημειώνεται ότι το κοντινότερο και πιο σημαντικό ρέμα, βρίσκεται νότια της θέσης κατασκευής του φρέατος, έχει γενική διεύθυνση ΒΑ – ΝΔ και κλίση προς τα ΝΔ. Απέχει από τη θέση κατασκευής του φρέατος περί τα 40μ και έχει μορφολογική κλίση 24% περίπου και μέσο βάθος περί τα 15μ.



(α) Ενδεικτική διατομή

(β) Εγκάρσια τεχνικογεωλογική τομή του φρέατος

Σχήμα 10-29. Φρέαρ Δρίσκου

Σύμφωνα με τη διαίρεση του Ελλαδικού χώρου σε γεωτεκτονικές ενότητες, η ευρύτερη περιοχή ανήκει στην Ιόνια ενότητα. Πιο συγκεκριμένα, στην ευρύτερη περιοχή της θέσης κατασκευής του φρέατος απαντώνται οι λιθολογικοί σχηματισμοί του φλύσχη της Ιονίου ενότητας, ο οποίος αποτελείται από εναλλαγές ψαμμιτικών και ιλυολιθικών στρωμάτων με επικράτηση πότε των ψαμμιτών και πότε των ιλυολίθων. Ενίοτε παρεμβάλλονται και χαρακτηριστικές ζώνες παχυστρωματωδών ψαμμιτών και κροκαλοπαγών. Όσον αφορά στις τεκτονικές συνθήκες της ευρύτερης περιοχής, ο βαθμός τεκτονισμού

είναι εν γένει μέτριος. Η δομή των σχηματισμών του φλύσχη παρουσιάζεται μονοκλινής με τα στρώματα να κλίνουν προς τα ΒΑ και ενίοτε προς τα ΒΒΑ, με τιμές κλίσης που κυμαίνονται από 10^{o} – 30^{o} περίπου. Στην ευρύτερη περιοχή δεν παρατηρήθηκαν ορατά ρήγματα, χωρίς όμως να αποκλείεται η ύπαρξή τους, η οποία εν γένει δύναται να επιβεβαιωθεί από τη μορφολογία του φυσικού ανάγλυφου (π.χ. ύπαρξη ρεμάτων).

Για τη διερεύνηση των υδρογεωλογικών συνθηκών στη θέση κατασκευής του φρέατος αερισμού, πραγματοποιήθηκαν συστηματικές μετρήσεις της στάθμης των υπογείων υδάτων κατά την όρυξη ερευνητικής γεώτρησης. Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των μετρήσεων συνάγονται τα ακόλουθα.

Κατά την κατασκευή του φρέατος αναμένεται να συναντηθεί επικρεμάμενος υδροφόρος ορίζοντας, σε βάθος από 70μ – 140μ περίπου. Ο συγκεκριμένος υδροφόρος, αναμένεται να παρουσιάζει το μέγιστο δυναμικό του τους χειμερινούς μήνες ή μετά από περίοδο έντονης βροχόπτωσης.

Στο υπόλοιπο τμήμα, αναμένεται η εμφάνιση υγρασίας ή στάγδην ροής, μέσω του δευτερογενούς πορώδους των σχηματισμών.

Για την εκτίμηση της υδροπερατότητας των σχηματισμών, εκτελέστηκαν δοκιμές εισπίεσης (Lugeon tests) καθώς και μία δοκιμή Maag, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Αποτελέσματα δοκιμών υδροπερατότητας.

Βάθος Δοκιμής (m)	**Συντελεστής Υδροπερατότητας k (m/sec)**	**Λιθολογική περιγραφή / Σχηματισμός**
3,80 - 4,30	4,77 x 10^{-7}	Εύθρυπτος αποσαθρωμένος ιλυόλιθος / **w**
6,10 – 10,10	5,39 x 10^{-6}	Εναλλαγές μεσοπλακωδών ψαμμιτών και ιλυολίθων / **SaSi**
15,00 – 18,60	7,91 x 10^{-6}	Καστανοπράσινος ψαμμίτης / **SaSi**
20,50 – 24,50	6,46 x 10^{-6}	Καστανοπράσινος ψαμμίτης / **SaSi**
26,50 – 29,70	1,43 x 10^{-5}	Πρασινοκάστανος κερματισμένος ψαμμίτης / **SaSi**
35,90 – 39,90	6,56 x 10^{-6}	Ανοικτότεφρος μεσόκοκκος ψαμμίτης / **SaSi**
47,00 – 50,00	3,87 x 10^{-6}	Εναλλαγές ανοικτότεφρου ψαμμίτη και κυανότεφρου ιλυόλιθου / **SiSa**
57,00 – 60,10	1,13 x 10^{-5}	Εναλλαγές κυανότεφρου ιλυόλιθου και ανοικτότεφρου ψαμμίτη / **SiSa**
69,00 – 72,00	6,2 x 10^{-6}	Ανοικτότεφρος ψαμμίτης με πάγκους κυανότεφρου ιλυόλιθου / **SaSi**
77,00 – 80,60	8,75 x 10^{-6}	Ανοικτότεφρος ψαμμίτης έντονα κερματισμένος / **SaSi**
87,50 – 90,70	9,5 x 10^{-6}	Εναλλαγές πάγκων ανοικτότεφρου ψαμμίτη και κυανότεφρου ιλυόλιθου / **SiSa**
107,00 – 111,20	2,84 x 10^{-6}	Κυανότεφρος ιλυόλιθος με πάγκους ψαμμίτη 3 – 15cm / **SiSa**
127,80 – 131,80	1,18 x 10^{-6}	Κυανότεφρος ιλυόλιθος έντονα αποσαθρωμένος και τεκτονισμένος / **SiSa**
146,50 – 149,70	2,17 x 10^{-6}	Εναλλαγές κυανότεφρου ιλυόλιθου και ανοικτότεφρου ψαμμίτη / **SiSa**
165,20 – 169,30	2,1 x 10^{-6}	Εναλλαγές κυανότεφρου ιλυόλιθου με στρώσεις ανοικτότεφρου ψαμμίτη / **SiSa**

Οι δοκιμές έδωσαν τιμές υδροπερατότητας της τάξης του 10^{-6} – 10^{-5} m/s. Το συγκεκριμένο εύρος τιμών υποδηλώνει ότι οι σχηματισμοί στην περιοχή κατασκευής του φρέατος είναι περατοί. Η διακύμανση των τιμών αποδίδεται στη γεωλογική δομή, δηλαδή στο πάχος των εναλλασσόμενων στρωμάτων καθώς και στο λιθολογικό τύπο των στρωμάτων αυτών. Η υδροπερατότητα αυξάνεται στις θέσεις όπου ψαμμίτες παρουσιάζονται σε μεγαλύτερη ποσοστιαία αναλογία από τους ιλυόλιθους, ενώ όπου επικρατούν οι ιλυόλιθοι, η υδροπερατότητα μειώνεται. Παρατηρήθηκε επίσης ότι ο συντελεστής διαπερατότητας μειώνεται με το βάθος, γεγονός που υποδηλώνει τη μείωση της συχνότητας εμφάνισης και του πάχους των ψαμμιτικών στρωμάτων και την αντίστοιχη αύξηση της συχνότητας εμφάνισης των ιλυολιθικών στρωμάτων.

Προκειμένου να προσδιορισθούν οι αντιπροσωπευτικές γεωτεχνικές παράμετροι για το εύρος των τεχνικογεωλογικών συνθηκών που συναντώνται στην περιοχή κατασκευής της σήραγγας, καθώς και οι παράμετροι των κριτηρίων αστοχίας Mohr - Coulomb, εφαρμόσθηκε η κατάταξη πετρωμάτων με βάση

το δείκτη GSI - Geological Strength Index. Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα στοιχεία γεωτεχνικής διερεύνησης και αξιολόγησης έγινε η επιλογή των γεωτεχνικών παραμέτρων σχεδιασμού των πιθανών τεχνικογεωλογικών ενοτήτων κατά τη διάνοιξη του φρέατος αερισμού Δρίσκου, οι οποίοι παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Γεωτεχνικές παράμετροι σχεδιασμού των τεχνικογεωλογικών ενοτήτων για το φρέαρ αερισμού της σήραγγας Δρίσκου.

	SaSi_D	***SiSa_E***	***SiSa_F***
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	***Εναλλαγές μεσοστρωματωδών ψαμμιτών και λεπτοστρωματωδών ιλυολίθων / Επικράτηση των ψαμμιτών***	***Εναλλαγές λεπτοστρωματωδών ψαμμιτών και λεπτοστρωματωδών ιλυολίθων / Επικράτηση των ιλυολίθων***	***Εναλλαγές λεπτοστρωματωδών ψαμμιτών και λεπτοστρωματωδών ιλυολίθων / Επικράτηση των ιλυολίθων / Έντονα αποσαθρωμένη βραχομάζα με χαοτική δομή / Παρουσία ρηγμάτων ή πιθανά διατμήσεων***
GSI	30 – 40	20 – 35	13 – 25
m_i	9	8	7
γ (KN/m^3)	26	26	26
σ_{ci} (MPa)	33	24	15
c (kPa)	400	280	150
φ (°)	25	22	15
E (MPa)	1800	1000	500

ΖΗΤΟΥΜΕΝΑ.

Να εξετάσετε την συμπεριφορά κατά τη διάνοιξη των πρώτων 100μ βάθους θεωρώντας ότι θα πραγματοποιηθεί σε κατηγορία εδάφους *SaSi_D*.

Να προσδιοριστούν τα εντατικά μεγέθη που ασκούνται σε προσωρινή επένδυση εκτοξευόμενου σκυροδέματος ιδιοτήτων που θα προσδιορίσετε σύμφωνα με τις τεχνικογεωλογικές συνθήκες και την επάρκεια της υποστήριξης.

Κεφάλαιο 11

Σύνοψη
Όταν το υπόγειο δόμημα βρίσκεται πλησίον της επίγειας επιφάνειας, τότε οικονομοτεχνικά είναι προτιμότερη η διάνοιξη του συνόλου ή μέρους του υπόγειου έργου να πραγματοποιείται με ανοικτή εκσκαφή από την επιφάνεια. Αναπτύσσονται οι μέθοδοι ανοικτής εκσκαφής. Η εμπέδωση επιτυγχάνεται με λυμένα παραδείγματα και ασκήσεις.

Προαπαιτούμενη γνώση
Μαθήματα: Εδαφομηχανική, Οπλισμένο σκυρόδεμα, Στατική. Χρήσιμη βιβλιογραφία: Wilton JL (1996).

11. Ανοικτή εκσκαφή

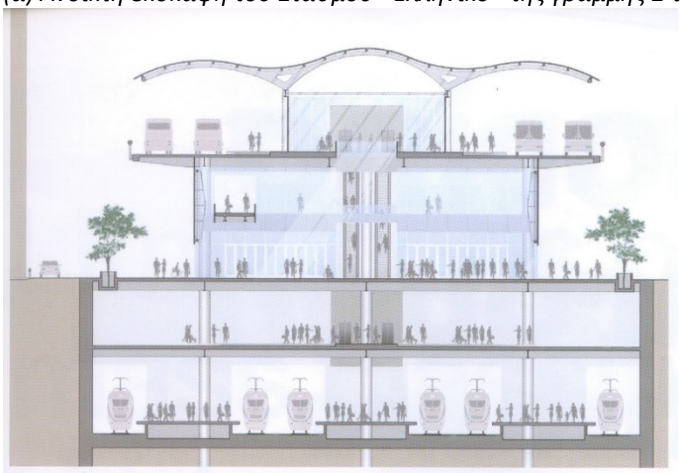
Για μικρά βάθη υπογείων ανοιγμάτων τεχνικοοικονομικά προκρίνεται συχνά η διάνοιξη με ανοικτή εκσκαφή είτε ολόκληρης της σήραγγας είτε μέρους αυτής. Παραδοσιακά η κατασκευή σήραγγας με ανοικτή εκσκαφή πραγματοποιείται με κοπή και επικάλυψη. Πρόκειται για μέθοδο κατασκευής εντός σκαμμένης τάφρου (κοπή-cut) που στη συνέχεια επικαλύπτεται (cover). Επέκταση της μεθόδου αποτελεί η μικτή εκσκαφή, κατά την οποία η οροφή της σήραγγας κατασκευάζεται σε συνθήκες ανοικτής εκσκαφής που στη συνέχεια επανεπιχώνεται (επικαλύπτεται-cover), ενώ η υπόλοιπη κοπή (cut) πραγματοποιείται υπόγεια. Οι μέθοδοι αυτές αποτελούν εναλλακτικές λύσεις για την κατασκευή σηράγγων. Αποχετευτικοί αγωγοί, συγκοινωνιακές σήραγγες και σήραγγες και σταθμοί μετρό, κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας αυτές τις τεχνικές. Για αβαθείς σήραγγες-σταθμούς με βάθη στέψης 10-15 m από την επίγεια επιφάνεια, η μέθοδος ανοικτής κοπής είναι γενικά φθηνότερη και απλούστερη σε σύγκριση με τις υπόγειες μεθόδους διάνοιξης. Αλλά και για βάθη 30 m, επιλέγονται συχνά ανοικτές εκσκαφές, για σήραγγες-σταθμούς μετρό, εφαρμόζοντας σύγχρονες τεχνικές κατασκευής. Η εφαρμογή της μεθόδου μειώνει τους κινδύνους σε σύγκριση με την υπόγεια διάνοιξη, ιδιαίτερα σε σχέση με τα θέματα υγιεινής και ασφάλειας.

11.1 Πεδίο εφαρμογής

Τα στόμια και τα τμήματα σηράγγων με χαμηλά υπερκείμενα (Σχήμα 11-1γ), οι περιοχές ορυγμάτων με κίνδυνο βραχοπτώσεων, καθώς και οι προσεγγίσεις σε ποντισμένες σήραγγες, κατασκευάζονται γενικά με ανοικτή εκσκαφή. Στις πόλεις, η ανοικτή εκσκαφή χρησιμοποιείται κυρίως για την κατασκευή των υπόγειων σταθμών του μετρό και δευτερευόντως των σηράγγων, εφόσον υπάρχει κατάλληλη πρόσβαση από την επιφάνεια του εδάφους. Για παράδειγμα η μέθοδος εφαρμόσθηκε σε πολλούς σταθμούς του ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ, όπως πχ στο σταθμό Ελληνικό (Σχήμα 11-1α) της γραμμής 2. Σύγχρονοι σταθμοί που κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας τεχνικές ανοικτής εκσκαφής μπορούν να προσφέρουν περισσότερους ανοικτούς χώρους σε σύγκριση με εκείνους που κατασκευάζονται με εξ ολοκλήρου υπόγεια διάνοιξη. Αυτή η μορφή σταθμών έχει γενικά δύο επίπεδα (Σχήμα 11-1β), που επιτρέπουν την οικονομική διάταξη για χολ έκδοσης εισιτηρίων, αποβάθρες του σταθμού, πρόσβαση και έξοδο έκτακτης ανάγκης των επιβατών, εξαερισμό και έλεγχο του καπνού, και χώρους προσωπικού και εξοπλισμού.



(α) Ανοικτή εκσκαφή του Σταθμού «Ελληνικό» της γραμμής 2 της «Αττικό Μετρό» (Χορηγήθηκε από Σ. Κουκουτά)



(β) Διάταξη σταθμού σε δύο επίπεδα (T&T, 2007)



(γ) Επέκταση δεξιού βόρειου στομίου σήραγγας Κλόκοβας – Επίκειται επίχωση πάνω από τη στεγάνωση.

Σχήμα 11-1. Εφαρμογές ανοικτής εκσκαφής

Η κατασκευή των υπόγειων έργων με ανοικτή εκσκαφή περιλαμβάνει ένα ευρύ και ποικίλο φάσμα τεχνικών. Ο σχεδιασμός τους απαιτεί εμπειρία και κατανόηση τόσον του δομικού σχεδιασμού (στατικής μελέτης) και της εδαφομηχανικής, όσον και των μεθόδων κατασκευής. Στις αστικές περιοχές τα δομήματα αυτά βρίσκονται γενικά υπό περιορισμό και ως εκ τούτου τα πρανή της εκσκαφής διαμορφώνονται κατακόρυφα. Βασικές εξελίξεις στις μεθόδους κατασκευής με ανοικτή εκσκαφή, τον προηγούμενο αιώνα, επιτρέψανε την αποτελεσματικότερη εφαρμογή της. Αυτές περιλαμβάνουν τη σημαντική εκμηχάνιση, όχι μόνο του ευρύ φάσματος εξοπλισμού για μαζική εκσκαφή, αλλά και του εξειδικευμένου εξοπλισμού για πασσαλοτοίχους και διαφραγματικούς τοίχους, τη δυνατότητα για μεγάλες ποσότητες έγχυσης σκυροδέματος, και τη χρήση ολισθαινόντων και αρθρωτών μεταλλοτύπων. Επίσης, τα αρχικά μέτρα στήριξης δύνανται πλέον να έχουν μόνιμη λειτουργία· για εκσκαφή εντός αντιστηριζόμενου χώρου, η τάση είναι για μείωση των συστημάτων

προσωρινής υποστήριξης, αξιοποιώντας τη δυνατότητα του μόνιμου δομήματος να παρέχει αυτή την υποστήριξη κατά τη διάρκεια της κατασκευής.

11.1.1 Μορφή

Η μορφή και η διάταξη των σηράγγων ανοικτής εκσκαφής ποικίλουν. Η επιλογή τους βασίζεται στις λειτουργικές απαιτήσεις σε συνδυασμό με την ευκολία κατασκευής. Επιδιώκεται η απλότητα της μορφής, όπου αυτή είναι πρακτικά δυνατή. Πολύπλοκα σχήματα, που προσφέρουν ελαχιστοποίηση των υλικών, μπορεί να μην είναι οικονομικά στην πράξη, αν είναι χρονοβόρα και δαπανηρά στην κατασκευή. Τα υπόγεια δομήματα πρέπει να μην επιτείνουν τη συγκέντρωση τάσεων που οδηγεί σε βλάβες, να είναι ανθεκτικά και να απαιτούν ελάχιστη συντήρηση.

Ένα άλλο σημαντικό κριτήριο επιλογής της μορφής και της διάταξης είναι η συμβατότητα με τους διαφορετικούς τύπους και τη σειρά κατασκευής των παρακείμενων δομημάτων. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτούν οι σημαντικές μεταβολές στη διατομή, την έδραση ή τις εδαφικές συνθήκες. Τυπικό παράδειγμα μεταβολής της διατομής αποτελεί η μετάβαση από το σταθμό στη σήραγγα. Επίσης, η κατασκευή παρακείμενων τμημάτων σε διαφορετικούς χρόνους, ιδιαίτερα όσον αφορά τις διαδοχικές ακολουθίες εκσκαφής και επίχωσης, μπορεί να δημιουργήσει ασύμβατες καθιζήσεις. Σε όλες τις περιπτώσεις, πρέπει να αξιολογούνται η επίδραση των διαχρονικών μετατοπίσεων του εδάφους τόσον κατά την κατασκευή όσον και κατά τη λειτουργία της σήραγγας. Τα παρακάτω σημεία πρέπει να ακολουθούνται όποτε αυτό είναι εφικτό:

- Υιοθέτηση απλών σχημάτων και λεπτομερειών.
- Διατήρηση διαστάσεων στοιχείων σταθερών, αποφεύγοντας μικρές αλλαγές.
- Αποφυγή αρμών διαστολής, εκτός αν είναι απαραίτητοι.
- Ελευθερία στη θέση των κατασκευαστικών αρμών και δυνατότητα για μεγάλες εγχύσεις σκυροδέματος.
- Εκμετάλλευση της αντοχής του μόνιμου δομήματος για τον περιορισμό της ανάγκης προσωρινής υποστήριξης.

11.1.1.1 Σταθμοί

Η θέση και η διάταξη των σταθμών αποτελεί πρώτο μέλημα κατά το σχεδιασμό γραμμών μετρό. Οι δύο αυτοί παράγοντες επηρεάζονται από τις λειτουργικές απαιτήσεις και περιορισμούς της χάραξης. Το βάθος της κατασκευής είναι επιθυμητό να είναι όσο το δυνατόν πιο ρηχό. Αυτό συντελεί στην ελαχιστοποίηση των εκσκαφών, τον χρόνο και το κόστος κατασκευής, και την απόσταση της πρόσβασης των χρηστών από το επίπεδο του δρόμου. Το μικρό βάθος είναι συμβατό επίσης με τις λειτουργικές απαιτήσεις για λιγότερη ενέργεια τροχοπέδησης και έλξης κατά την είσοδο και έξοδο από τους σταθμούς, που γι' αυτό βρίσκονται στις κορυφές των καμπυλών μηκοτομικής χάραξης. Τα τρένα επιβραδύνονται κατά την άφιξη στο σταθμό και αντιστρόφως επιταχύνονται κατά την αποχώρηση. Κατά το σχεδιασμό, διερευνώνται οι συνθήκες του εδάφους και επιλέγονται το βάθος, το πλάτος, και η μέθοδος κατασκευής. Η διάταξη των σηράγγων επηρεάζει τη διατομή του σταθμού. Οι υπόγεια διανοιγμένες δίδυμες σήραγγες μετρό, εφόσον οι κλάδοι τους απέχουν μεταξύ τους, στους σταθμούς τους δύνανται να διαμορφώνονται με κεντρικές πλατφόρμες. Αντίθετα, οι σήραγγες ανοικτής κοπής διαμορφώνονται εντός στενού χώρου, με τις τροχιές τους πλησίον, και ως εκ τούτου οι σταθμοί τους διαμορφώνονται γενικά με πλευρικές πλατφόρμες, όπως π.χ. οι υπόγειοι Σταθμοί Βικτώρια και Μοναστηράκι του ΗΣΑΠ. Η βαθιά και πολύπλοκη κατασκευή σταθμού συναρτάται με διασταυρώσεις που εξυπηρετούν περισσότερες από μία γραμμές, όπως πχ ο Σταθμός του Συντάγματος του ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ.

11.1.1.2 Σήραγγες

Η διαμόρφωση των σηράγγων διέπεται από τη χωροθέτηση των λωρίδων ή τροχιών και την ανάγκη ενσωμάτωσης εγκαταστάσεων, όπως οι διασταυρώσεις και οι αλλαγές τροχιάς. Κατά συνέπεια, η διατομή τους ποικίλει τόσον στον αριθμό των ανοιγμάτων όσον και στη θεμελίωσή τους.

Ανοικτά πλαίσια δύνανται να κατασκευαστούν σε ορύγματα με κεκλιμένα ή κατακόρυφα πρανή. Επιλέγονται εκεί όπου απαιτούνται μεγάλα ανοίγματα, δηλαδή για δύο ή περισσότερες παρακείμενες λωρίδες ή τροχιές, και ο εδαφικός σχηματισμός παρέχει επαρκή φέρουσα ικανότητα χωρίς πλάκα βάσης. Για επιμήκη πέδιλα είναι συχνά επιθυμητός ο περιορισμός της προς τα έξω προβολής τους, χωρίς να ξεπερνιούνται τα όρια των επιτρεπόμενων τάσεων και καθιζήσεων. Ο περιορισμός αυτός συντελεί στη μείωση του όγκου της

εκσκαφής και της επίχωσης. Η απομείωση του πάχους του τοίχου με το βάθος συντελεί στη μείωση των ροπών κάμψης στη στήριξη. Αυτή η διαμόρφωση, ωστόσο, προσθέτει πολυπλοκότητα στο καλούπι, ιδιαίτερα όταν ποικίλουν τα εσωτερικά ύψη και ανοίγματα και όταν η τροχιά έχει μικρή ακτίνα καμπυλότητας.

Τα κιβώτια αποτελούν την πιο κοινή μορφή σήραγγας ανοικτής εκσκαφής. Η ενσωμάτωση του πασσαλοτοίχου στο μόνιμο δόμημα, εφαρμόζεται όλο και περισσότερο κατά την κατασκευή κατακόρυφων πρανών. Η διάδραση εδάφους-δομήματος, στην περίπτωση αυτή, απαιτεί εντελώς διαφορετική μελέτη σε σχέση με των κιβωτίων που διαμορφώνονται πλήρως εντός τύπων. Οι διαφορές είναι πιο έντονες όταν η πλάκα βάσης αναρτάται μεταξύ των τοίχων αντί να εδράζεται στο έδαφος. Κιβώτια με εδραζόμενες στο έδαφος πλάκες βάσης κατασκευάζονται γενικά είτε μεταξύ κεκλιμένων πρανών είτε μεταξύ κατακόρυφων πρανών αντιστηριζόμενων προσωρινά από πασσαλοσανίδες. Όπου συνδέονται οι δύο μορφές κιβωτίων, θα πρέπει να εξετάζεται η συμβατότητα των συνθηκών έδρασης.

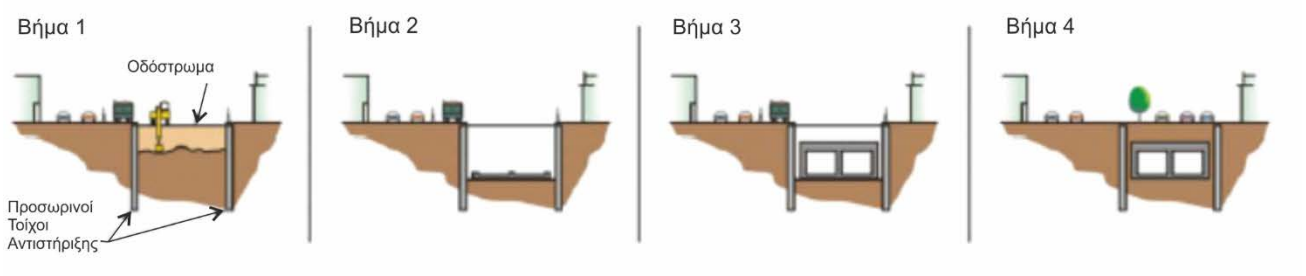
Σε κεκλιμένες εκσκαφές πρανών, τα κιβώτια είναι πιο σταθερά από τα ανοικτά πλαίσια, καθόσον η πλάκα της βάσης τους παρέχει περισσότερη στήριξη στους τοίχους τους σε σχέση με τα επιμήκη πέδιλα των πλαισίων. Αυτός ο παράγων μπορεί να αξιοποιηθεί για την έγκαιρη επίχωση των πλευρών του κιβωτίου πριν από την ολοκλήρωση της πλάκας οροφής. Το σχήμα του κιβωτίου είναι επίσης πιο στιβαρό στη μόνιμη λειτουργία, όντας πολύ λιγότερο ευαίσθητο στις δονήσεις και τα πλευρικά φορτία. Ωστόσο, ένας βασικός κίνδυνος των κιβωτίων είναι η αστάθεια έναντι επίπλευσης, τόσον κατά την κατασκευή όσον και κατά τη λειτουργία. Ο κίνδυνος είναι δυνητικά κρίσιμος πριν από την ολοκλήρωση της επίχωσης της οροφής, ιδιαίτερα εάν υπάρχει καθυστέρηση αυτού του σταδίου. Το νεκρό φορτίο του κιβωτίου είναι τότε το ελάχιστο, ενώ μπορεί να εξακολουθεί να είναι υψηλό το επίπεδο των υπόγειων υδάτων. Τούτο δύναται να ξεπεραστεί με την παροχή των κατάλληλων προσωρινών μέτρων αποστράγγισης. Η πλευρική αποστράγγιση του μόνιμου δομήματος είναι γενικά επιθυμητή. Δεν συνιστάται, όμως, η αποστράγγιση, ως μέτρο για τη διατήρηση αποδεκτού συντελεστή ασφάλειας έναντι επίπλευσης του μόνιμου δομήματος Μια τέτοια επαχθής εξάρτηση από τη συνεχιζόμενη αποτελεσματικότητα του συστήματος αποστράγγισης, θα απαιτούσε συνεχή επιθεώρηση και συντήρηση. Είναι προτιμότερη η ενσωμάτωση μέτρων όπως πασσάλων εφελκυσμού, όπου δεν είναι πρακτικά ή οικονομικά εφικτή η αύξηση του νεκρού βάρους του δομήματος. Μία σήραγγα ανοικτής εκσκαφής μπορεί επίσης να δημιουργήσει ένα εμπόδιο στην υφιστάμενη ροή των υπογείων υδάτων, με πιθανές επιπτώσεις στα παρακείμενα δομήματα και στην επίπλευση της σήραγγας.

11.1.2 Μέθοδοι κατασκευής

Οι μέθοδοι κατασκευής είναι είτε (α) εκ των κάτω προς τα άνω (cut and cover) είτε (β) εκ των άνω προς τα κάτω (cover and cut). Δομήματα από οπλισμένο σκυρόδεμα εντός κεκλιμένων πρανών είναι γενικά οι φθηνότερες μορφές σηράγγων κοπής και επικάλυψης. Σε αστικές περιοχές, η γειτνίαση με υφιστάμενα κτίρια, δρόμους και αγωγούς κοινής ωφελείας απαιτεί τη διάνοιξη εντός κατακόρυφων αντιστηριζόμενων πρανών. Στην περίπτωση αυτή αυξάνεται το άμεσο κόστος σημαντικά, λόγω της απαίτησης χρήσης ειδικού εξοπλισμού και εφαρμογής προσωρινής υποστήριξης. Το κόστος που συνδέεται με την αναστάτωση που επιφέρουν τα έργα στην επιφάνεια μπορεί να είναι πολύ υψηλό και η επιλογή της μεθόδου κατασκευής συχνά διέπεται από την ανάγκη για την ελαχιστοποίησή του. Συχνά, είναι καλύτερα να μεγιστοποιηθεί το μήκος της υπόγειας διάνοιξης και να εφαρμοστεί η ανοικτή εκσκαφή μόνο όπου είναι απαραίτητη, χρησιμοποιώντας μεθόδους που μειώνουν τη διάρκεια των αναστάτωσης στην επιφάνεια, όπως η τεχνική της εκ των άνω προς τα κάτω δόμησης. Η επιλογή της πλευρικής στήριξης υπαγορεύεται από τη στενότητα του χώρου (διαφορετικές τεχνικές και εξοπλισμός χρειάζονται διαφορετικό χώρο λειτουργίας), τον τύπο και τη διαθεσιμότητα των μηχανημάτων (διαφέρει για τις διάφορες χώρες και οι τοπικές πρακτικές επηρεάζουν το κόστος και την επιλογή του εξοπλισμού), τις συνθήκες του εδάφους και την ανάγκη ελέγχου των μετακινήσεων, και τον χρονικό προγραμματισμό.

11.2 Δόμηση εκ των κάτω προς τα άνω (κοπής & επικάλυψης - cut & cover)

Κατά τη μέθοδο αυτή (Σχήμα 11-2), η εκσκαφή του πλήρους ορύγματος προηγείται της κατασκευής του δομήματος της σήραγγας. Η σήραγγα κατασκευάζεται ως ένας δύσκαμπτος κυβωτιοειδής ή πεταλοειδής φορέας μέσα στο όρυγμα.



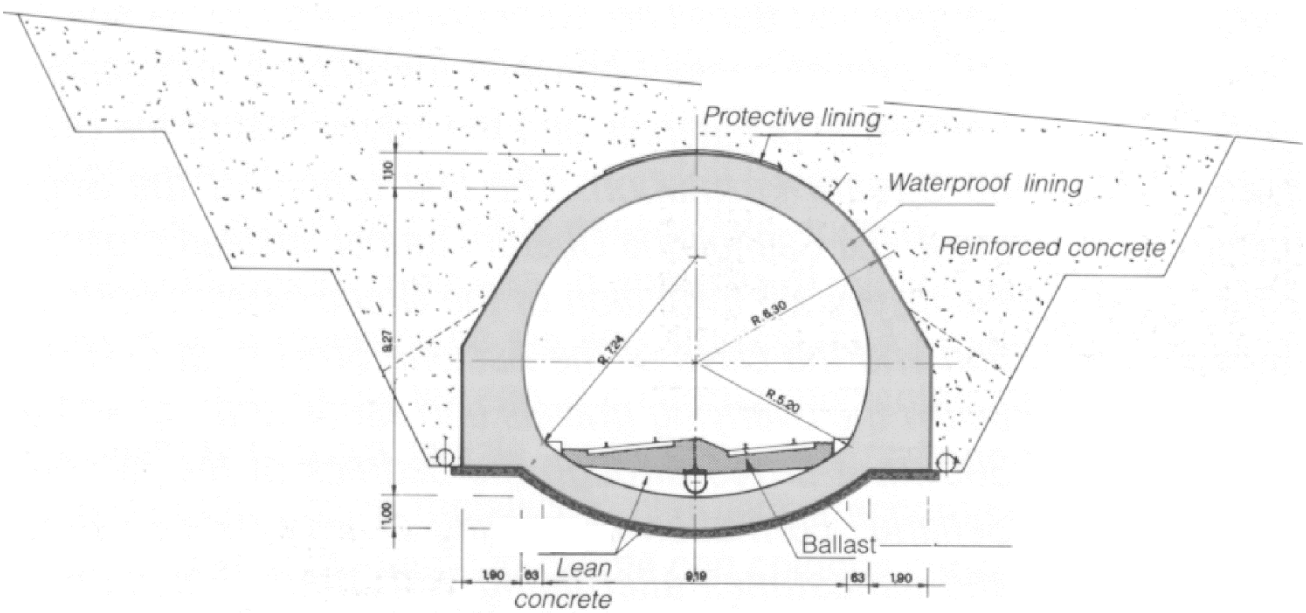
Σχήμα 11-2. Δόμηση εκ των κάτω προς τα άνω (NHI, 2009)

11.2.1 Το όρυγμα της σήραγγας

Η εκσκαφή αβαθών, μέχρι 6m, ορυγμάτων γίνεται συνήθως με τσάπα η οποία και φορτώνει απ' ευθείας τα μπάζα στα φορτηγά. Για βαθύτερα ορύγματα η εκσκαφή γίνεται είτε με κάδους τύπου αρπάγης είτε με αυτοκινούμενους εκσκαφείς. Προσοχή θα πρέπει να δίνεται στον έλεγχο της στάθμης του νερού έξω από το όρυγμα. Τα νερά μέσα στο όρυγμα αντλούνται από τάφρους συγκέντρωσής τους. Προκειμένου να κατασκευασθεί το όρυγμα της σήραγγας απαιτείται η διαμόρφωση ασφαλών πρανών. Αυτά είναι δυνατόν να είναι είτε κεκλιμένα είτε κατακόρυφα.

11.2.1.1 Κεκλιμένα πρανή

Όπου ο χώρος κατασκευής το επιτρέπει, όπως σε περιοχές έξω από την πόλη, η εκσκαφή συμφέρει οικονομικά να πραγματοποιείται με τη διαμόρφωση ευσταθών κεκλιμένων πρανών (Σχήμα 11-3). Η κλίση των πρανών καθορίζεται από τη συνοχή και τη γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους. Δεδομένου ότι η κατασκευή του ορύγματος έχει προσωρινή σημασία, λαμβάνεται μειωμένος συντελεστής ασφαλείας κατά τους υπολογισμούς.



Σχήμα 11-3. Διατομές διπλής σιδηροδρομικής σήραγγας κατασκευασμένης σε ανοικτή εκσκαφή με κεκλιμένα πρανή, FE.S.P.I., Linea diretissima Roma-Firenze, tratta Arezzo sud - Figline Valdarno.

11.2.1.2 Αντιστηριζόμενα κατακόρυφα πρανή

Η ανεπάρκεια ελεύθερου χώρου, που υπάρχει στις πόλεις, αλλά και συχνά εκτός αυτών, επιβάλει την κατασκευή κατακόρυφων πρανών. Η απαίτηση για ευστάθεια των κατακόρυφων αυτών πρανών απαιτεί συνήθως την αντιστήριξή τους με τοιχία (Σχήμα 11-4), από πασσαλοσανίδες (sheet piles), συμβατικούς τοίχους αντιστήριξης, διαφραγματικούς τοίχους (trench walls), φρεατοπασσάλους, η κατασκευή των οποίων επιφέρει αύξηση του κόστους.



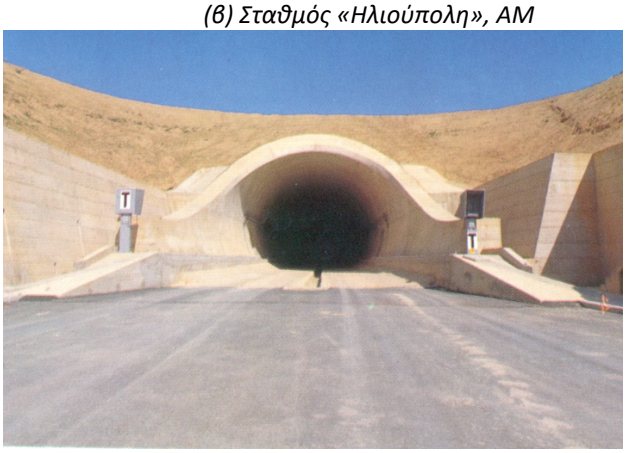
α) Σήραγγα Nordhavensvej μήκους 620 m, κατασκευασμένη με κοπή και επικάλυψη. Τα τοιχία σκυροδετούνται εντός τοιχίου φρεατοπασσάλων βάθους 25 m. Η πλάκα οροφής έχει πάχος 80 cm.



(β) Σταθμός «Ηλιούπολη», ΑΜ



(γ) Σταθμός Αγία Βαρβάρα, γραμμής 3, Μετρό Αθήνας



(δ) Στόμιο σιδηροδρομικής σήραγγας κοπής και επίχωσης, και στήριξη πρανών από τοιχία.

Σχήμα 11-4. Διαμόρφωση κατακόρυφων πρανών (Η εικόνα β χορηγήθηκε από τον κ. Αλαφογιάννη)

Τυχόν καθιζήσεις σε κοπές στην άμμο οφείλονται είτε σε μετακίνηση της αντιστήριξης προς τα μέσα είτε σε απώλεια εδάφους μεταξύ των πασσάλων. Στα ίδια αίτια οφείλονται οι τυχόν καθιζήσεις σε κοπές σε στιφρές αργίλους. Σε κοπές σε μαλακές αργίλους το έδαφος στα πλευρά δρα σαν επιφόρτιση με αποτέλεσμα τη διαρροή του εδάφους στον πυθμένα. Τούτο έχει ως αποτέλεσμα την αστοχία του εδάφους και την ανύψωσή του στον πυθμένα του ορύγματος. Οι εδαφικές πιέσεις που ασκούνται στην αντιστήριξη εξαρτώνται από τον τύπο της αντιστήριξης και από την ποιότητα του εδάφους. Οι Peck et al. (1974) δίνουν περιβάλλουσες της κατανομής της φαινόμενης πίεσης σχεδιασμού του εδάφους για τον υπολογισμό της αντιστήριξης.

11.2.2 Αντιστήριξη πρανών εκσκαφής

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αντιστήριξη των εκσκαφών. Ο σχεδιασμός του συστήματος αντιστήριξης εξαρτάται από παράγοντες, που περιλαμβάνουν:

- τη φύση της γεωμάζας εντός της οποίας πραγματοποιείται η εκσκαφή, συμπεριλαμβανομένης και αυτής κάτω από το τελικό επίπεδο της εκσκαφής
- τη θέση του υδροφόρου ορίζοντα κατά την κατασκευή
- το πλάτος και το βάθος της εκσκαφής

- τη διαμόρφωση του υπόγειου δομήματος που πρόκειται να κατασκευαστεί και αν η αντιστήριξη των πρανών θα ενσωματωθεί σε αυτό ή όχι
- την εγγύτητα της εκσκαφής σε παρακείμενα δομήματα
- τον αριθμό, το μέγεθος και το είδος των αγωγών κοινής ωφέλειας που διασχίζουν την προτεινόμενη εκσκαφή ή γειτονεύουν με αυτήν
- την επιφόρτιση του υπόγειου δομήματος από την κυκλοφορία ή τον εξοπλισμό
- τον περιορισμό του θορύβου σε αστικές περιοχές.

Οι συνήθεις μέθοδοι αντιστήριξης της εκσκαφής είναι:
- πασσαλοσανίδες με δοκούς και αντηρίδες, ή αγκύρια εδάφους
- αγκύρια εδάφους
- εγκιβωτισμένοι σε σκυρόδεμα μεταλλικοί πάσσαλοι με οριζόντιες σανίδες επικάλυψης
- διαφραγματικοί τοίχοι
- μεγάλης διαμέτρου φρεατοπάσσαλοι, συνεχόμενοι ή τεμνόμενοι.

Οι πιο κοινές μέθοδοι προσωρινής αντιστήριξης, περιλαμβάνουν τη χρήση τοιχίων από χαλύβδινες πασσαλοσανίδες ή εγκιβωτισμένους μεταλλικούς πασσάλους (king ή soldier piles) με ενδιάμεσο σανίδωμα, αντιστηριζόμενων από αντηρίδες ή αγκύρια. Λιγότερο συχνή είναι η χρήση προσωρινών διαφραγματικών τοίχων ή τοίχων φρεατοπασσάλων, από οπλισμένο σκυρόδεμα. Όμως, οι τελευταίοι δύνανται να αξιοποιούνται ως αρχικά και μόνιμα μέτρα υποστήριξης. Προσωρινοί διαφραγματικοί τοίχοι χρησιμοποιούνται συνήθως ως αντιστήριξη στις θέσεις δημιουργίας στομίων μεταξύ τμημάτων υπόγειας διάνοιξης και κοπής και επικάλυψης, πριν από την επικάλυψη των τελευταίων. Τα παραπάνω τοιχία συγκρατούνται στη θέση τους από είτε από αγκύρια εδάφους είτε από αντηρίδες. Οι διάφορες μέθοδοι βελτίωσης του εδάφους, με ενέσεις, μειώνουν τις απαιτήσεις αντίστασης από τα τοιχία. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα προσωρινά τοιχία συχνά παραμένουν γύρω από τη σήραγγα μετά την ολοκλήρωσή της και μπορεί να αποτελούν εμπόδια σε μελλοντικά έργα. Είναι σημαντικό επομένως να τηρούνται λεπτομερή αρχεία των εγκατεστημένων προσωρινών έργων.

11.2.2.1 Συγκράτιση των τοιχίων

Τα τοιχία αναλαμβάνουν τα φορτία που τους ασκούν τα πρανή ως πρόβολοι πακτωμένοι στο έδαφος. Η ικανότητα αυτής της πάκτωσης είναι περιορισμένη, και προς τούτο συγκρατούνται από αντηρίδες ή αγκύρια εδάφους, ή συνδυασμό τους, προκειμένου να μετατραπούν από πρόβολοι σε μονόπακτες αμφιέρειστες ή πολυέρειστες δοκούς.

11.2.2.1.1 Αντηρίδες

Η προσωρινή αντιστήριξη των τοιχίων των κατακόρυφων πρανών των ανοικτών ορυγμάτων, πραγματοποιείται συχνά με αντηρίδες (Σχήμα 11-5α). Η επιλογή τους εξαρτάται από τη μορφή και τη διάταξη του δομήματος, τις συνθήκες του εδάφους, την απαίτηση για τον έλεγχο των εδαφικών κινήσεων και τη γενική μέθοδο κατασκευής. Τα φορτία που αναλαμβάνονται μπορεί να είναι σημαντικά, ιδίως σε βαθιές εκσκαφές σε ισχυρά υπερστερεοποιημένη άργιλο. Κατά συνέπεια, η προσωρινή αντηρίδωση μπορεί να αποτελεί σημαντικό μέρος του συνολικού κόστους κατασκευής. Πρέπει επομένως, χωρίς να μειώνεται ο βαθμός ασφάλειας, να εξετάζεται η ενδεχόμενη μείωση ή εξάλειψη των προσωρινών μέτρων αντιστήριξης. Αυτό μπορεί να επιτυγχάνεται με την αξιοποίηση της εγγενούς αντοχής των μόνιμων μέτρων και της κατά περίπτωση υψηλότερης βραχυπρόθεσμης αντοχής του εδάφους, σε συνδυασμό με την ταχύτητα και την ακολουθία δόμησης.



(α)Αντηρίδες αντιστήριξης σταθμού Ανθούπολη



(β) Αγκύρια εδάφους για την αντιστήριξη σταθμού

Σχήμα 11-5. Αντηρίδες και αγκύρια αντιστήριξης σταθμών του «Αττικό Μετρό» (Αρχείο της «Αττικό Μετρό»)

11.2.2.2 Αγκύρια εδάφους

Τα αγκύρια εδάφους (Σχήμα 11-5β) μπορούν να χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με άλλα μέτρα αντιστήριξης, αντί των αντηρίδων, ώστε να μην υφίστανται εμπόδια στο εσωτερικό του ορύγματος, μολονότι οι αντηρίδες είναι πιο στιβαρές και ασφαλείς έναντι αστοχίας. Τα αγκύρια μπορούν να προεντείνονται ώστε να παρεμποδίζεται η πλευρική μετατόπιση της αντιστήριξης. Ωστόσο, τα αγκύρια εδάφους, εκτείνονται πολύ πίσω από τη γραμμή του τοίχου αντιστήριξης, και επομένως δυνητικά έξω από τα όρια απαλλοτρίωσης του έργου. Στην περίπτωση αυτή πρέπει να εξασφαλισθεί ότι δεν υπάρχει επίπτωση στα παρακείμενα υπόγεια ή άλλες υπόγειες κατασκευές και ότι κατάλληλες άδειες έχουν δοθεί από τους ιδιοκτήτες της παρακείμενης γης. Υπάρχει πληθώρα τύπων αγκυρίων και η επιλογή βασίζεται στον τύπο του εδάφους.

Η μέθοδος ανόρυξης πρέπει να εξασφαλίζει τη σταθερότητα του διατρήματος, έτσι ώστε να μπορεί να εισάγεται το αγκύριο και να ενεματώνεται. Το διάτρημα μπορεί να ανορύσσεται με περιστροφική κρουστική διάτρηση και σωλήνωση σε κοκκώδη εδάφη ή με διάτρηση κοίλου στελέχους σε λεπτόκοκκο έδαφος. Το διάτρημα είναι συνήθως διπλάσιο της διαμέτρου του τένοντα, τυπικά 100 έως 250 mm. Η διαδικασία ενεμάτωσης μπορεί να επιτυγχάνεται με μία τεχνική tremie, δηλαδή το ένεμα να αντλείται μέσω ενός σωλήνα στο τέρμα της οπής και το κενό να γεμίζεται εκτοπίζοντας τον αέρα ή το νερό προς τα εξωτερικό άκρο του διατρήματος. Τα αγκύρια προεντείνονται με τη χρήση βαθμονομημένων υδραυλικών γρύλων συνδεμένων με το άνω άκρο τους, ή αν είναι μία ράβδος με σπείρωμα, με ένα ροπόκλειδο.

11.2.2.3 Τοιχία

11.2.2.3.1 Χαλύβδινες πασσαλοσανίδες

Αυτές παρέχουν μια σχετικά απλή λύση αντιστήριξης εκσκαφών σε μαλακό έδαφος, εφόσον δεν υπάρχουν εμπόδια στο έδαφος, όπως ογκόλιθοι ή υφιστάμενα θεμέλια. Οι πασσαλοσανίδες εμπήγνυνται στο έδαφος στο απαιτούμενο βάθος και διασυνδέονται με τις γειτονικές τους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 11-6. Κατά μήκος του τοιχώματος των πασσαλοσανίδων τοποθετούνται οριζόντιες δοκοί και εγκάρσια στην εκσκαφή τοποθετούνται αντηρίδες, για τη συγκράτηση του ορύγματος και τη μείωση των μετακινήσεων των πασσαλοσανίδων. Οι αντηρίδες δυσκολεύουν την πρόσβαση στο όρυγμα και γι' αυτό μπορούν εναλλακτικά να χρησιμοποιηθούν αγκύρια εδάφους. Η οριζόντια απόσταση μεταξύ των αντηρίδων ή των αγκυρίων, και ο αριθμός των σειρών τους με το βάθος της εκσκαφής, πρέπει να επιλέγονται προσεκτικά στο στάδιο της μελέτης ώστε να ελαχιστοποιούνται οι πλευρικές μετατοπίσεις των πασσαλοσανίδων και οι εξ αυτών καθιζήσεις. Προκειμένου να μειώνονται οι πλευρικές μετατοπίσεις, μπορεί να επιβάλλεται προένταση στις αντηρίδες ή στα αγκύρια.



(α) Έμπηξη πασσαλοσανίδων μήκους 18m - WSDT



(α) Τοίχος αντιστήριξης πρανούς - Flickr

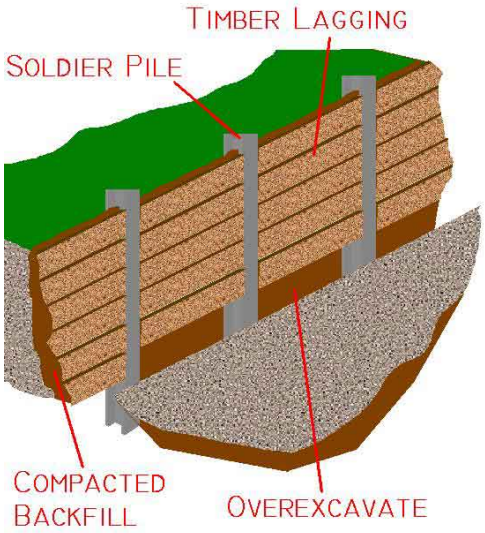
Σχήμα 11-6. Αντιστήριξη από πασσαλοσανίδες

11.2.2.3.2 Πάσσαλοι ορθοστάτες (king piles ή soldier piles – Berlin wall)

Πάσσαλοι ορθοστάτες είναι μια τεχνική προσωρινής αντιστήριξης του εδάφους, χρησιμοποιώντας κατακόρυφους χαλύβδινους πασσάλους και οριζόντιο σανίδωμα. Τυπικά, πάσσαλοι πρότυπης βαριάς διατομής Η, εμπήγνυνται ή προτιμότερα εγκαθίστανται σε έτοιμα διατρήματα (Σχήμα 11-7α) που γομώνονται στη συνέχεια με αραιό σκυρόδεμα, σε τακτά διαστήματα (1.5-3.0m) κατά μήκος της περιμέτρου προγραμματισμένης εκσκαφής. Αν υπάρχει βραχώδες υπόβαθρο σε κατάλληλο βάθος, τότε το εσωτερικό άκρο του πασσάλου μπορεί να πακτωθεί στο βράχο.



(α) Τοποθέτηση πασσάλων σε ανορυγμένα διατρήματα (© MTA).



(β) Σανίδωμα μεταξύ των ορθοστατών



(γ) Αντηρίδες συγκράτησης

Σχήμα 11-7. Πάσσαλοι ορθοστάτες

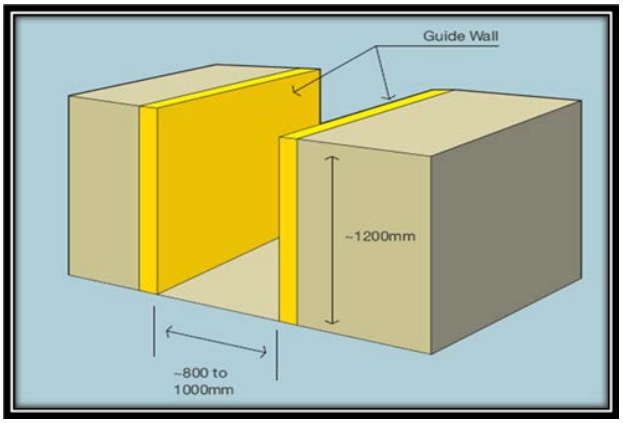
Το σανίδωμα (Σχήμα 11-7β & γ), που είναι από ξύλο, χάλυβα ή προκατασκευασμένα στοιχεία από σκυρόδεμα, τοποθετείται πίσω από τα μπροστινά πέλματα των πασσάλων κατά τη βύθιση της εκσκαφής. Ο χώρος πίσω από το σανίδωμα γομώνεται και συμπυκνώνεται. Το σανίδωμα ανθίσταται στο φορτίο του αντιστηριζόμενου έδαφος και το μεταφέρει στους πασσάλους. Οι τοίχοι σχεδιάζονται είτε ως απλοί πρόβολοι είτε, σε βαθύτερες εκσκαφές, ως φορείς που λαμβάνουν πρόσθετη πλευρική αντιστήριξη από αγκύρια εδάφους ή αντηρίδες.

Οι τοίχοι από πασσάλους ορθοστάτες είναι οικονομικά συμφέροντα συστήματα, σε σύγκριση με άλλους τοίχους αντιστήριξης. Επίσης, εγκαθίστανται εύκολα και γρήγορα, προσαρμόζονται εύκολα στις επιτόπου συνθήκες, και δεν απαιτούν προηγμένες τεχνικές κατασκευής. Στα μειονεκτήματά τους συγκαταλέγονται ότι, (α) δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνθήκες με υψηλό υδροφόρο ορίζοντα χωρίς εκτεταμένη αποστράγγιση, (β) η κακή οπισθογόμωση και απώλεια εδάφους μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική καθίζηση στην επίγεια επιφάνεια, (γ) δεν προσφέρουν επαρκώς άκαμπτο σύστημα συγκράτησης σε σχέση με άλλα συστήματα, και (δ) επειδή μόνον οι πάσσαλοι πακτώνονται κάτω από το έδαφος, δύσκολα ελέγχονται οι κινήσεις του εδάφους κάτω από το επίπεδο της εκσκαφής.

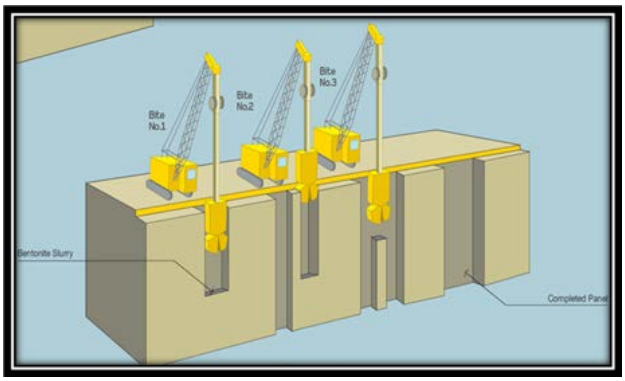
11.2.2.3.3 Διαφραγματικοί τοίχοι

Οι διαφραγματικοί τοίχοι είναι τοίχοι από οπλισμένο σκυρόδεμα, συνήθως έγχυτο επιτόπου, κατασκευασμένοι σε τάφρο που αντιστηρίζεται από πολφό μπεντονίτη. Στην Ελλάδα εφαρμόστηκε κατά την κατασκευή σταθμών των Μετρό της Θεσσαλονίκης και της Αθήνας (σταθμός Πειραιά). Συνήθως είναι μέρος του μόνιμου φέροντος περιμετρικού τοίχου. Το Σχήμα 11-8 δείχνει την γενική αρχή κατασκευής ενός επιτόπου έγχυτου διαφραγματικού τοίχου. Αρχικά κατασκευάζεται τοίχωμα καθοδήγησης (Σχήμα 11-8α) που καθορίζει τη θέση του διαφραγματικού τοίχου. Στη συνέχεια κατασκευάζεται ο τοίχος σε φατνώματα. Τυπικά μήκη φατνωμάτων σε μαλακό έδαφος είναι 2 έως 3 m, αλλά σε ισχυρότερα εδάφη το μήκος του φατνώματος μπορεί να φτάσει τα 6 m. Η αρπάγη εκσκαφέας (Σχήμα 11-8β) της τάφρου αποκόπτει και απομακρύνει το έδαφος για τη διαμόρφωση του φατνώματος. Η εκσκαφή σταθεροποιείται με την πλήρωση της με πολφό μπεντονίτη ο οποίος υποστηρίζει τα τοιχώματα. Ο γερανός (Σχήμα 11-8γ) σηκώνει τον κλωβό οπλισμού και τον τοποθετεί μέσα στο φάτνωμα. Το σκυρόδεμα εγχέεται στο κάτω μέρος του γεμισμένου με πολφό φατνώματος, εκτοπίζοντας

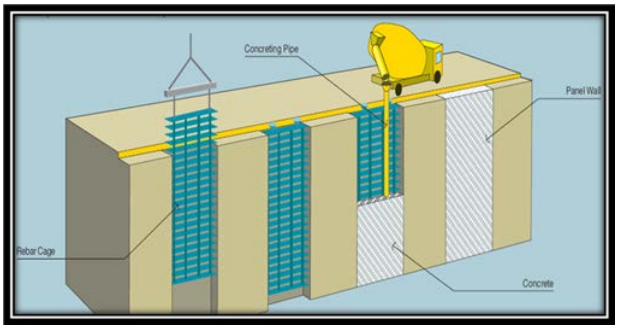
τον πολφό. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μεταξύ των ήδη κατασκευασμένων φατνωμάτων μέχρις ότου ολοκληρωθεί το συνολικό μήκος του διαφραγματικού τοίχου (Σχήμα 11-8δ).



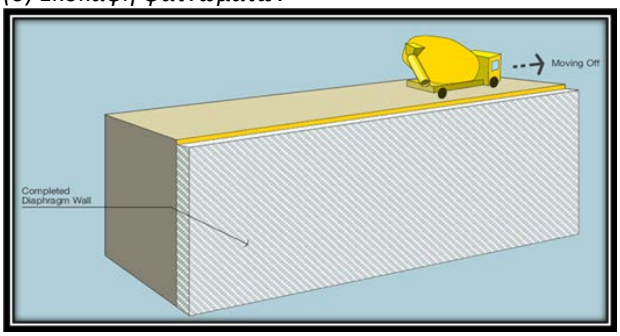
(α) Κατασκευή τοίχου οδηγού



(β) Εκσκαφή φατνωμάτων



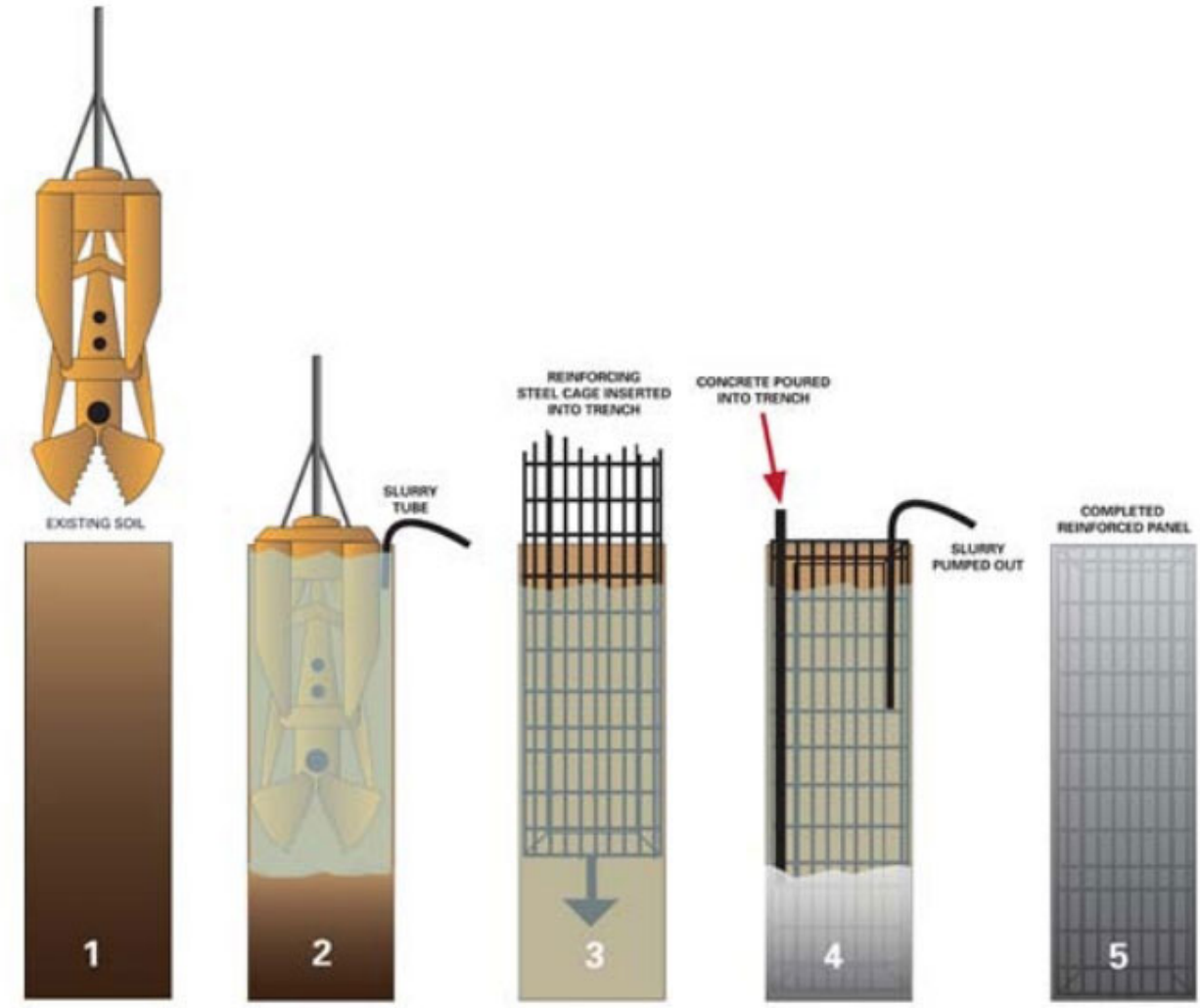
(γ) Τοποθέτηση κλωβού οπλισμού και σκυροδέτηση



(δ) Επανάληψη διαδικασίας για τα ενδιάμεσα φατνώματα

Σχήμα 11-8. Διαδικασία κατασκευής διαφραγματικού τοίχου με την τεχνική της τάφρου πολφού

Υπάρχουν διάφορες διαθέσιμες τεχνικές εκσκαφής για την απομάκρυνση του εδάφους μέσω του πολφού. Το Σχήμα 11-9 δείχνει τις φάσεις διαμόρφωσης φατνώματος τοίχου με χρήση κάδου εκσκαφής τύπου αρπάγης αχιβάδας. Αρχικά (φάσεις 1 & 2) εκσκάπτεται το έδαφος ενώ ο χώρος εκσκαφής είναι γεμάτος με πολφό. Μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής τοποθετείται ο κλωβός (φάση 3), και στη συνέχεια (φάση 4) αρχίζει να γεμίζει από κάτω το φάτνωμα με το βαρύτερο σκυρόδεμα και να αδειάζει από πάνω ο ελαφρύτερος πολφός, μέχρις ότου σκυροδετηθεί πλήρως (φάση 5) το φάτνωμα.



Σχήμα 11-9. Λεπτομέρεια φάσεων β και γ προηγούμενου σχήματος για την κατασκευή φατνώματος

Η εκσκαφή δύναται να πραγματοποιείται και από ειδικό καδοφόρο εκσκαφέα (Σχήμα 11-10α), καθώς και από ειδική αρπάγη (Σχήμα 11-10γ) ή υδραυλική φρέζα εξοπλισμένη με δύο τύμπανα κοπής με κόφτες ενισχυμένους με καρβίδια βολφραμίου, που περιστρέφονται σε αντίθετες κατευθύνσεις (Σχήμα 11-10β).

Το υγρό αντιστήριξης είναι πολφός μπεντονίτη που βασίζεται στις θιξοτροπικές ιδιότητες αντοχής του. Θιξοτροπικό είναι το υλικό που όταν δεν αναδεύεται είναι στερεό ενώ σε κατάσταση ανάδευσης είναι υγρό. Τα υλικά που αποκομίζονται κατά την εκσκαφή εμπεριέχουν έδαφος και πολφό μπεντονίτη. Ο τελευταίος στη συνέχεια διαχωρίζεται από το εδαφικό υλικό και επαναχρησιμοποιείται (Xanthakos, 1993).

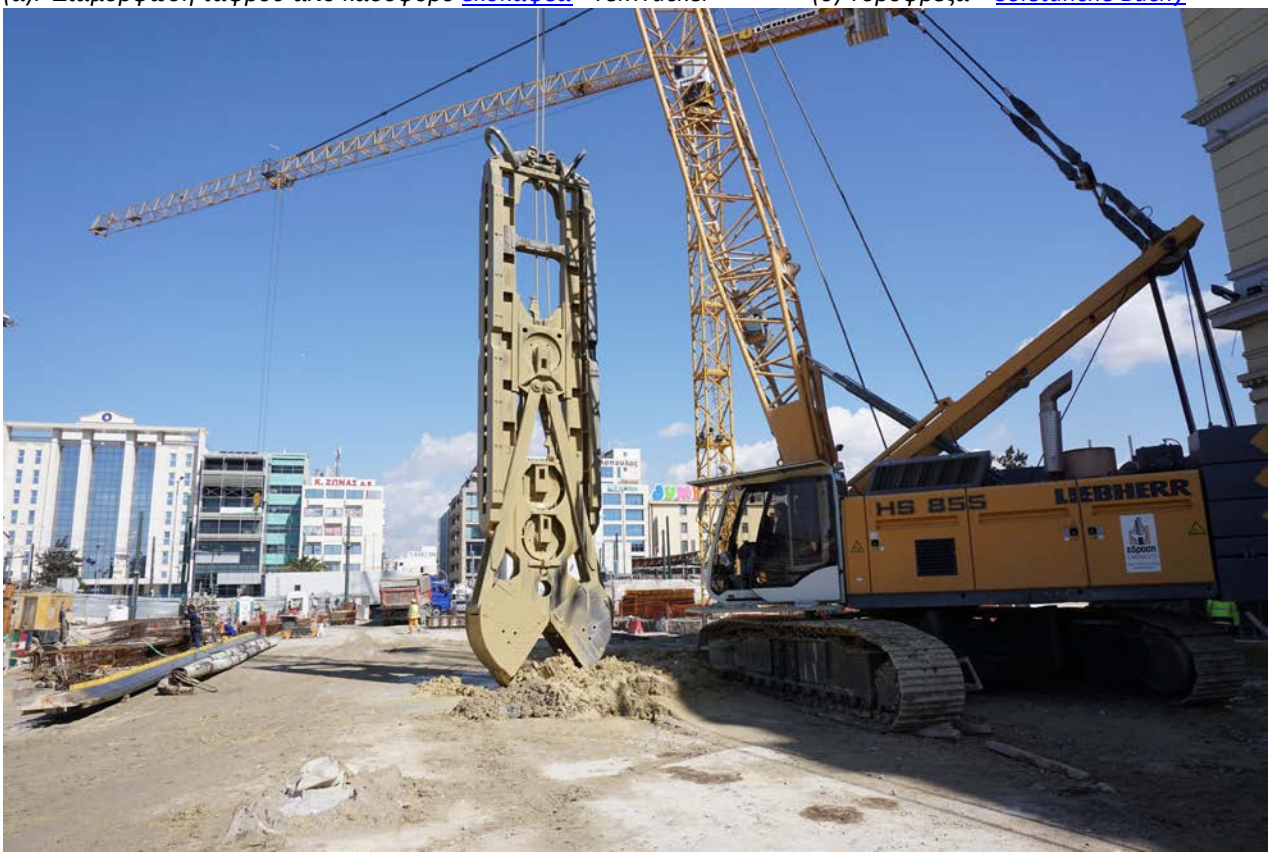
Μεμονωμένα φατνώματα διαφραγματικών τοίχων μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως στύλοι υποστήριξης, σε βάθη έως και 120 m. Ο κύριος περιορισμός είναι η κατασκευαστική ανοχή σε σχέση με την κατακορυφότητα. Η υδροφρέζα (Σχήμα 11-10β) προσφέρει την ακριβέστερη μέθοδο για την κατασκευή πολύ βαθιών διαφραγματικών τοίχων.



(α). Διαμόρφωση τάφρου από καδοφόρο εκσκαφέα - TekTracker



(β) Υδροφρέζα – Soletanche Bachy



(γ) Αρπάγη για τη διαμόρφωση διαφραγματικού τοίχου στο Σταθμό του Μετρό στον Πειραιά.

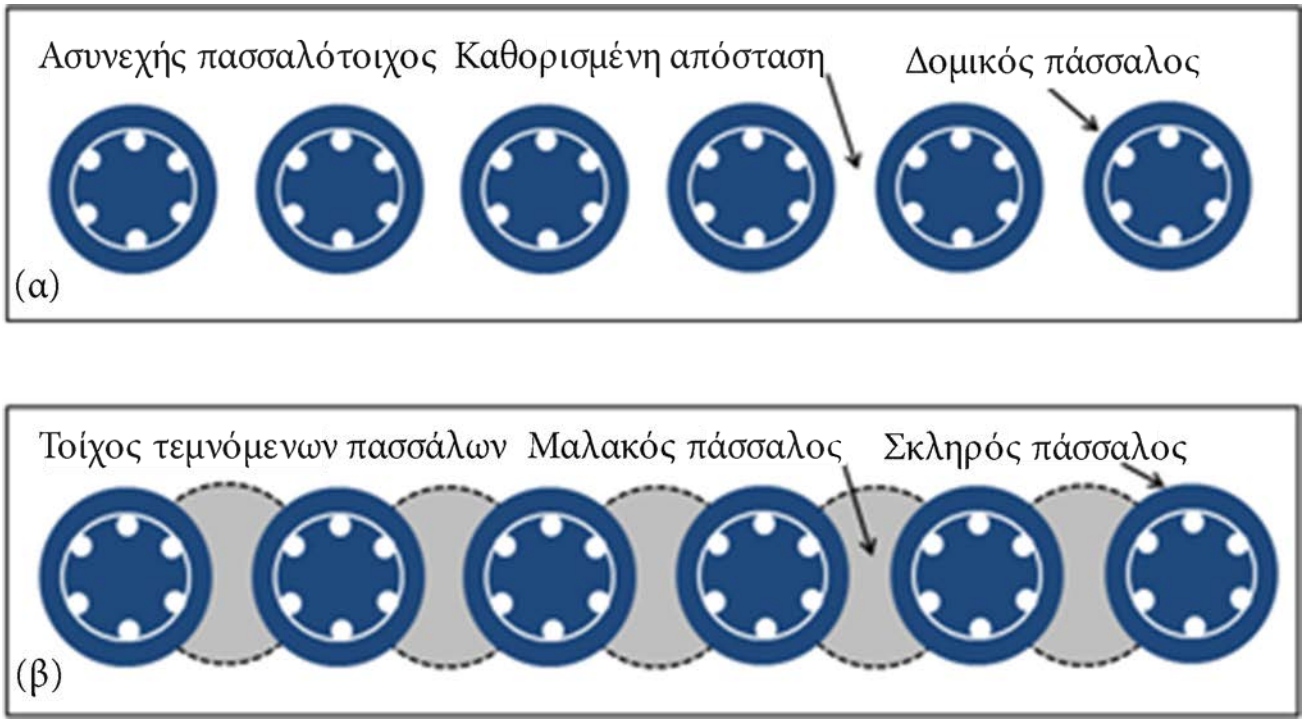
Σχήμα 11-10. Μηχανές κοπής για τη διαμόρφωση τάφρων

Λόγω της εγγενούς στεγανότητάς τους, οι διαφραγματικοί τοίχοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να σχηματίσουν ένα φράγμα στα υπόγεια νερά με την εμπέδωσή τους στο στρώμα που υπόκειται της θεμελίωσης. Εφόσον το στρώμα αυτό είναι χαμηλής διαπερατότητας ή προκύπτει μετά από βελτίωσή του, ο έλεγχος των υπογείων νερών μπορεί να είναι πολύ αποτελεσματικός, με προφανή οφέλη κατά τη διάρκεια της κατασκευής. Το βάθος εμπέδωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης για τον έλεγχο της κάμψης του τοίχου και της σταθερότητας. Επιπλέον, η αύξηση του βάθους εμπέδωσης και η αξιοποίηση της εγγενούς δυσκαμψίας του τοίχου δίνουν τη δυνατότητα μείωσης της προσωρινής στήριξης, όπως των αντηρίδων ή των αγκυρίων εδάφους. Στο μόνιμο δόμημα, η εμπέδωση δίνει τη δυνατότητα χρήσης αναρτημένης πλάκας βάσης, ώστε να μειώνεται ή εξαλείφεται η υδροστατική και η εδαφική πίεση. Ωστόσο, πρέπει να αξιολογούνται προσεκτικά οι συνέπειες του φραξίματος της φυσικής εγκάρσιας ροής των υπογείων υδάτων, ιδίως αν ο τοίχος εκτείνεται μέσα σε ένα αδιαπέρατο στρώμα κάτω από ένα διαπερατό.

11.2.2.3.4 Μεγάλης διαμέτρου φρεατοπάσσαλοι

Τοίχος αντιστήριξης πραγματοποιείται από μεγάλης διαμέτρου φρεατοπασσάλους, από επιτόπου έγχυτο σκυρόδεμα, τοποθετημένους σε κοντινά διαστήματα. Οι πάσσαλοι, φτάνουν μέχρι το απαιτούμενο βάθος

θεμελίωσης, και μπορούν να είναι ασυνεχείς (Σχήμα 11-11α), εφαπτόμενοι ή τεμνόμενοι (Σχήμα 11-11β), οπλισμένοι ή άοπλοι.



Σχήμα 11-11. Φρεατοπάσσαλοι - BURRAS Ltd

Οι τοίχοι από τεμνόμενους (secant) πασσάλους αποτελούνται συνήθως από εναλλασσόμενους άοπλους και οπλισμένους πασσάλους (Σχήμα 11-11β). Ο άοπλοι κατασκευάζονται πρώτοι και έπονται οι οπλισμένοι οι οποίοι αποκόπτουν τμήμα του άοπλου πασσάλου. Εναλλακτικά, τα κέντρα των άοπλων και των οπλισμένων πασσάλων μπορεί να βρίσκονται σε διαφορετικές ευθείες· η διαμόρφωση αυτή παρέχει στον τοίχο σημαντικά μεγαλύτερη αντοχή. Εφόσον οι πάσσαλοι σε κάτοψη διαμορφώνουν κύκλο (όπως πχ. στα φρέατα) ή αψίδα, τότε στατικά λειτουργούν αντί ως δοκοί πρόβολοι, ως κέλυφος, με αποτέλεσμα να προσφέρουν πολύ μεγάλη στιβαρότητα (Powderham, 1990). Οι τεμνόμενοι πάσσαλοι παρέχουν στεγανοποίηση, που όμως σε σύγκριση με τους διαφραγματικούς τοίχους, μειονεκτεί ως προς: (α) τις μεγαλύτερες απαιτήσεις χώρου εργοταξίου, (β) το βραδύτερο ρυθμό της κατασκευής, (γ) τη δυσκολία σύνδεσης των κυκλικών διατομών και το λιγότερο αποδεκτό εκτιθέμενο τελείωμα, (δ) τους περισσότερους κατασκευαστικούς αρμούς.

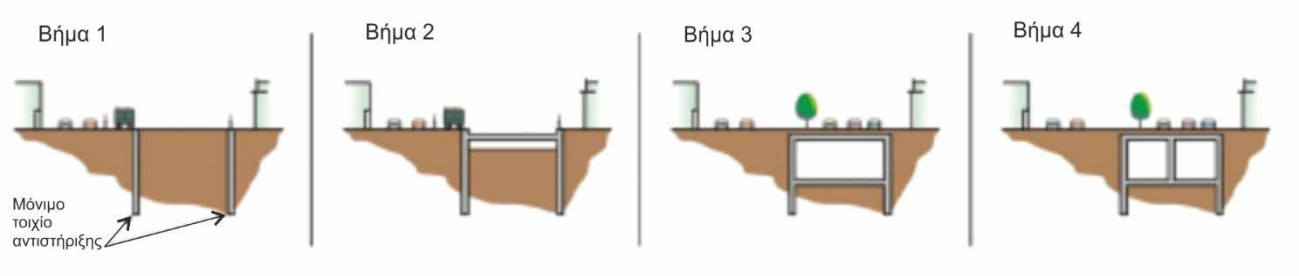
Οι τοίχοι από ασυνεχείς (contiguous) πασσάλους αποτελούνται από σειρά διαδοχικών ασύνδετων πασσάλων σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους. Προσφέρουν έναν γρήγορο και οικονομικό τρόπο της κατασκευής. Ωστόσο, ακόμη και για ιδανικές εδαφικές συνθήκες, μειονεκτούν των τεμνόμενων πασσάλων σε στεγανότητα.

Οι τοίχοι από πασσάλους πολφού είναι τεμνόμενοι πάσσαλοι. Περιλαμβάνουν πασσάλους από πολφό μπεντονίτη/τσιμέντο, οι οποίοι εγκαθίστανται πρώτοι. Στη συνέχεια, ανάμεσά τους εγκαθίστανται πάσσαλοι από οπλισμένο σκυρόδεμα, που αποτελούν τα δομικά στοιχεία του τοίχου. Έτσι δημιουργείται μια συμπλεγμένη εναλλασσόμενη ακολουθία τεμνόμενων πασσάλων από οπλισμένο σκυρόδεμα και πολφό/τσιμέντο, που σχηματίζει έναν υδατοστεγή τοίχο. Αυτή η τεχνική μπορεί να προσφέρει γρήγορη και οικονομική κατασκευή, που όμως είναι εφαρμόσιμη μόνο σε κατάλληλες συνθήκες εδάφους και βάθη εκσκαφής μέχρι περίπου 10m.

11.3 Δόμηση σήραγγας εκ των άνω προς τα κάτω (top down ή cover & cut)

Αντί της προσωρινής αντιστήριξης του ορύγματος μέχρι τον πυθμένα και της εν συνεχεία κατασκευής του μόνιμου έργου είναι δυνατή η κατασκευή του μόνιμου έργου κατά την εκσκαφή των διαδοχικών επιπέδων του έργου. Η μέθοδος ονομάζεται κατασκευή εκ των άνω προς τα κάτω (upside-down construction).

Χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι η γρήγορη κατασκευή της οροφής του υπόγειου ανοίγματος και η απόδοση του επίγειου χώρου στην πρότερη κατάσταση, και η στη συνέχεια εκσκαφή και κατασκευή της σήραγγας κάτω από την κατασκευασμένη οροφή (Σχήμα 11-12). Η σήραγγα κατασκευάζεται συνήθως από έγχυτο σκυρόδεμα.



Σχήμα 11-12. Δόμηση εκ των άνω προς τα κάτω (NHI, 2009)

11.3.1 Κατασκευή σταθμών

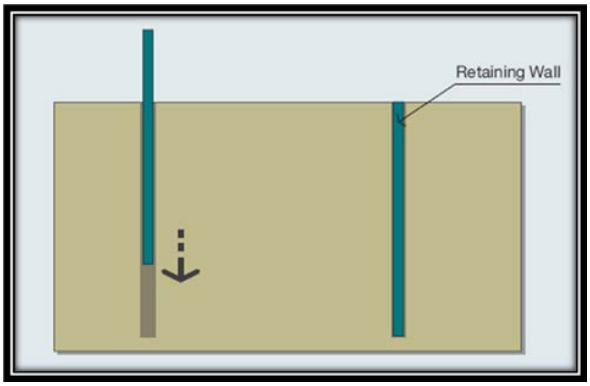
Από το επίπεδο της επιφάνειας του εδάφους, κατασκευάζονται οι τοίχοι αντιστήριξης και οι δοκοί κάλυψης των τοίχων στην κορυφή των πλευρικών τοιχωμάτων. Αυτοί οι τοίχοι κατασκευάζονται συνήθως με χρήση είτε διαφραγματικών τοίχων είτε πασσάλων. Η οροφή του υπόγειου έργου κατασκευάζεται στη συνέχεια κοντά στην επιφάνεια του εδάφους μέσα σε μία αβαθή τάφρο. Σε αυτήν την οροφή αφήνονται ανοίγματα πρόσβασης, αλλά κατά τα άλλα η επιφάνεια του εδάφους μπορεί να αποκατασταθεί. Η υπόλοιπη διαδικασία της κατασκευής λαμβάνει χώρα κάτω από αυτή την οροφή μέσω των ανοιγμάτων πρόσβασης. Επειδή η αποκατάσταση της επιφάνειας, έστω και μερικώς, συμβαίνει σχετικά γρήγορα, η ενδεχόμενη διατάραξη στις αστικές περιοχές μπορεί να ελαχιστοποιηθεί. Ωστόσο, οι υπόλοιπες εργασίες πραγματοποιούνται εντός του περιορισμένου υπόγειου χώρου. Η κατασκευή ενός σταθμού περιλαμβάνει την ακολουθία:

- Παράκαμψη γραμμών κοινής ωφέλειας, διαμόρφωση επιπέδου εργασίας, και εγκατάσταση τοίχου από πασσάλους ή διάφραγμα.
- Εκσκαφή μέχρι την αποκάλυψη του άνω μέρους του τοίχου.
- Τοποθέτηση του οπλισμού και έγχυση του σκυροδέματος της πλάκας οροφής.
- Επίχωση πάνω από την επιφάνεια της πλάκας, όπως απαιτείται, και αποκατάσταση της επίγειας επιφάνειας για να καταστεί δυνατή η έγκαιρη αποδέσμευσή της, που με τη σειρά της επιτρέπει την έγκαιρη αποκατάσταση των γραμμών κοινής ωφελείας και των λειτουργιών (του δρόμου, των καταστημάτων, κλπ.).
- Η κατασκευή συνεχίζεται κάτω από την πλάκα οροφής, ουσιαστικά απομονωμένη από το περιβάλλον της επίγειας επιφάνειας.

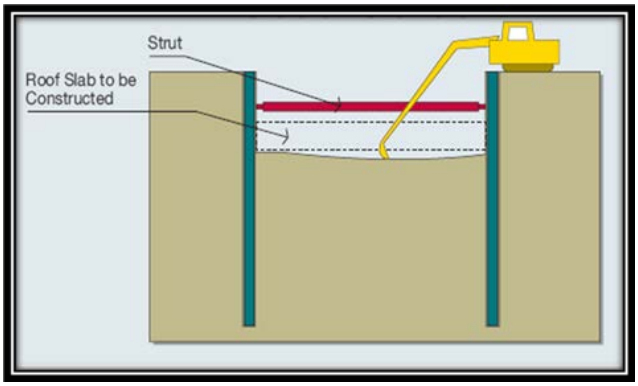
Η σειρά ενεργειών δύναται να διαφέρει:

- στο χρόνο επίχωσης και παράδοσης του μόνιμου οδοστρώματος, που αποδίδεται στο τέλος (Σχήμα 11-13ς), αντί, όπως αναφέρεται παραπάνω, αμέσως μετά τη ρηχή εκσκαφή, και που γι' αυτό κατασκευάζεται αρχικά, μετά από τη ρηχή εκσκαφή, προσωρινό οδόστρωμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 11-13γ.
- στη σειρά των υπόγειων εργασιών, κάτω από την πλάκα οροφής, κατά τις οποίες η μόνιμη κατασκευή δύναται να ακολουθεί πορεία είτε από πάνω προς τα κάτω, όπως φαίνεται στο Σχήμα 11-13, είτε από κάτω προς τα πάνω (cut & cover – bottom up).

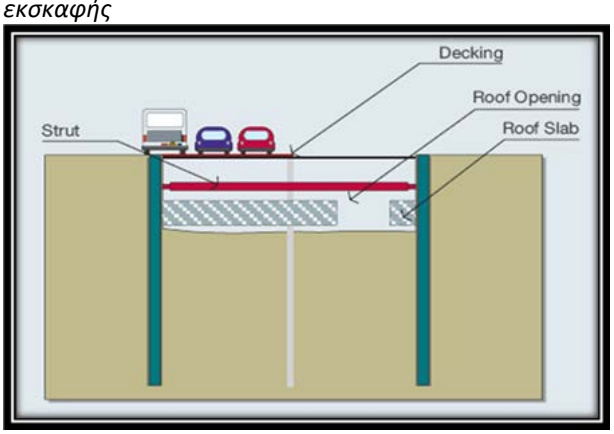
Οφέλη που προσφέρονται από την εκ των άνω προς τα κάτω δόμηση, αφορούν: (α) την ταχεία απόδοση της επίγειας επιφάνειας στη λειτουργία της πόλης, (β) τη μείωση του θορύβου και της σκόνης στην επίγεια επιφάνεια, (γ) τις προστατευμένες, από την κακοκαιρία, συνθήκες διάνοιξης, (δ) τον έλεγχο των κινήσεων του εδάφους λόγω της στιβαρότερης και αδιαπέρατης από το νερό κατασκευής, (ε) τον έλεγχο της ταπείνωσης του υδροφόρου ορίζοντα, λόγω της αδιαπερατότητας των τοίχων που εμπήγνυνται σε βαθύτερα λιγότερο περατά στρώματα, (ς) το μειωμένο κόστος, λόγω της μείωσης των προσωρινών κατασκευών, που όμως αντισταθμίζεται από το μεγαλύτερο κόστος της υπόγειας κατασκευής.



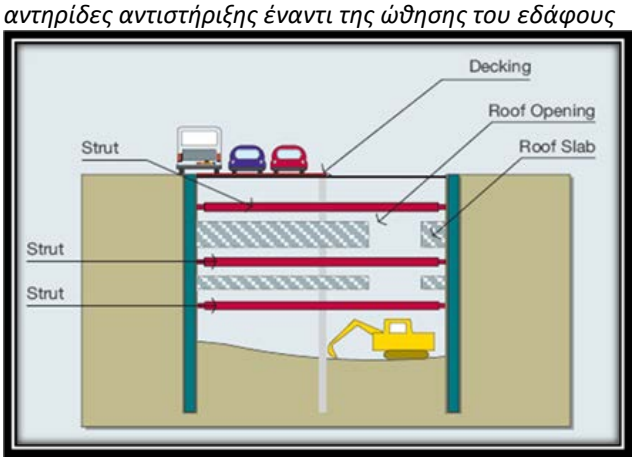
(α) Ο τοίχος αντιστήριξης, που συχνά είναι διαφραγματικός, τοποθετείται πριν από την έναρξη της εκσκαφής



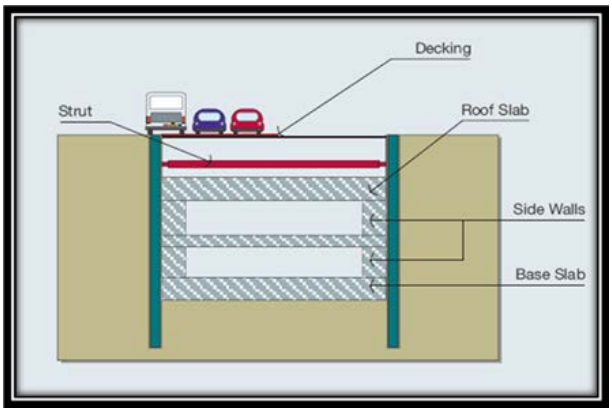
(β) Το έδαφος εκσκάπτεται μόλις κάτω από την πλάκα οροφής της υπόγειας κατασκευής – Τοποθετούνται αντηρίδες αντιστήριξης έναντι της ώθησης του εδάφους



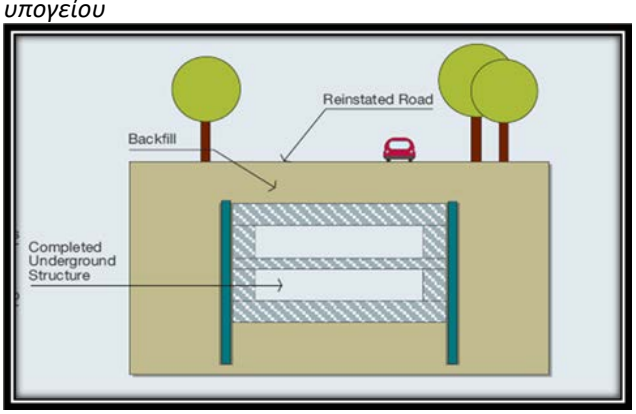
(γ) Κατασκευή πλάκας οροφής και προσωρινού οδοστρώματος, με ανοίγματα πρόσβασης



(δ) Προχώρηση στο δεύτερο στάδιο της εκσκαφής – Κατασκευή πλάκας οροφής του δεύτερου επιπέδου υπογείου



(ε) Κατασκευή της πλάκας θεμελίωσης – Αφαίρεση των αντηρίδων & Κατασκευή πλευρικών τοιχίων εκ των κάτω προς τα άνω



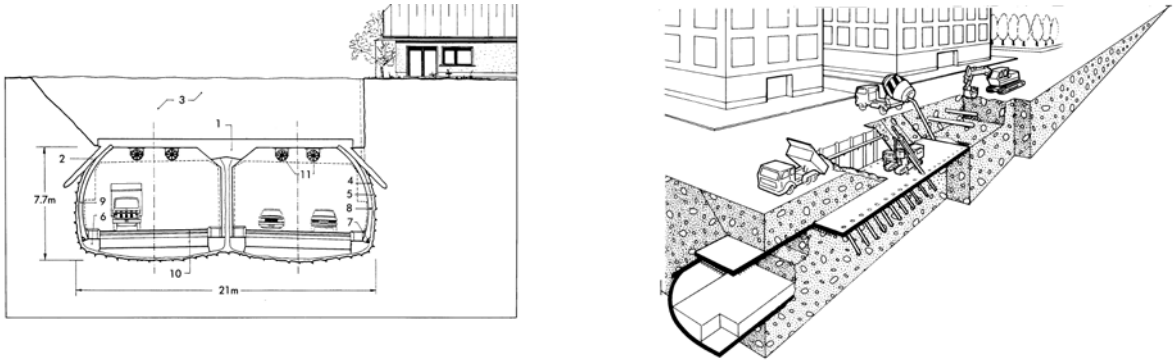
(ς) Αποκατάσταση του εδάφους και του οδοστρώματος. Η αποκατάσταση δύναται να γίνει στο γ στάδιο, προκειμένου να παραδοθεί άμεσα το οδόστρωμα στην κυκλοφορία

Σχήμα 11-13. Εκ των άνω προς τα κάτω δόμηση (Top-Down).

11.3.2 Κατασκευή σηράγγων

Όταν η εκσκαφή πρέπει να γίνει κάτω από αστικούς δρόμους η ανοικτή εκσκαφή προκαλεί δυσκολίες στη διέλευση των οχημάτων και γενικά στις επιφανειακές δραστηριότητες. Αυτή η ενόχληση μειώνεται με την εκσκαφή της σήραγγας σε δύο φάσεις, μία ανοικτή μέχρι του βάθους της οροφής της σήραγγας και μία υπόγεια κάτω από αυτήν. Υπάρχει ποικιλία τέτοιων μεθόδων.

Η τυπική εφαρμογή της μεθόδου περιλαμβάνει σε πρώτη φάση, από την επίγεια επιφάνεια, την εγκατάσταση κατακόρυφων πασσάλων πλευρικά της σήραγγας, την εκσκαφή του εδάφους μέχρι του επιπέδου της οροφής της σήραγγας, την κατασκευή της πλάκας οροφής της σήραγγας από οπλισμένο σκυρόδεμα και την επικάλυψη της οροφής και αποκατάσταση του δρόμου. Στην επόμενη φάση πραγματοποιείται υπόγεια η διάνοιξη και κατασκευή της σήραγγας. Εναλλακτικά, η μέθοδος doorframe (πλαισίωσης), που φαίνεται στο Σχήμα 11-14, κάνει χρήση λοξών πασσάλων. Στην πρώτη φάση της μεθόδου αυτής πραγματοποιούνται από την επίγεια επιφάνεια κατά σειρά, η εκσκαφή του εδάφους μέχρι του επιπέδου της οροφής της σήραγγας, η τοποθέτηση λοξών πασσάλων πλευρικά της σήραγγας, η κατασκευή της πλάκας οροφής της σήραγγας από οπλισμένο σκυρόδεμα και η επικάλυψη της οροφής και αποκατάσταση του δρόμου. Στην επόμενη φάση γίνεται υπόγεια η διάνοιξη και κατασκευή της σήραγγας.



1 Πλάκα από σκυρόδεμα, 2 Πάσσαλοι αντιστήριξης, 3 Επίχωση, 4 Θεωρητική εκσκαφή, 5 Άμεση υποστήριξη, 6 Θεμελίωση, 7 Πλευρική σωλήνα απορροής με επικάλυψη πορώδους σκυροδέματος 8 Στεγάνωση, 9 Τελική επένδυση από άοπλο σκυρόδεμα, 10 Οδόστρωμα, 11 Ανεμιστήρες εξαερισμού.

Σχήμα 11-14. Διάνοιξη σήραγγας κάτω από γρήγορα κατασκευασμένη οροφή στηριζόμενη σε λοξούς πασσάλους (doorframe slab; Sauer, 1994)

11.4 Μελέτη

11.4.1 Γενικά

Η σήραγγα πρέπει να είναι μελετημένη ώστε να αναλαμβάνει τις διάφορες συνθήκες φόρτισης που είναι πιθανό να αντιμετωπίσει κατά τη διάρκεια ζωής της, λαμβάνοντας υπόψη την ακολουθία των κατασκευαστικών φάσεων Η μελέτη της αντιστήριξης πρέπει να εξασφαλίζει ελαχιστοποίηση των μετατοπίσεων και των επαγόμενων καθιζήσεων σε παρακείμενα δομήματα και γραμμές κοινής ωφελείας. Μετατοπίσεις του εδάφους μπορεί να προκληθούν, από την εκσκαφή του ορύγματος ή από την όρυξη για την τοποθέτηση πασσάλων ή διαφραγματικών τοίχων. Πρέπει επίσης να εξετάζεται η επίδραση της προσωρινής ή μόνιμης ταπείνωσης των υπόγειων υδάτων στα παρακείμενα δομήματα. Το κόστος και ο προγραμματισμός είναι κρίσιμες πτυχές κάθε έργου και η ευκολία και ταχύτητα κατασκευής αποτελούν κυρίαρχα ζητήματα. Η ταχύτητα της κατασκευής μπορεί επίσης να είναι πολύ σημαντική για τη μείωση των βραχυπρόθεσμων περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

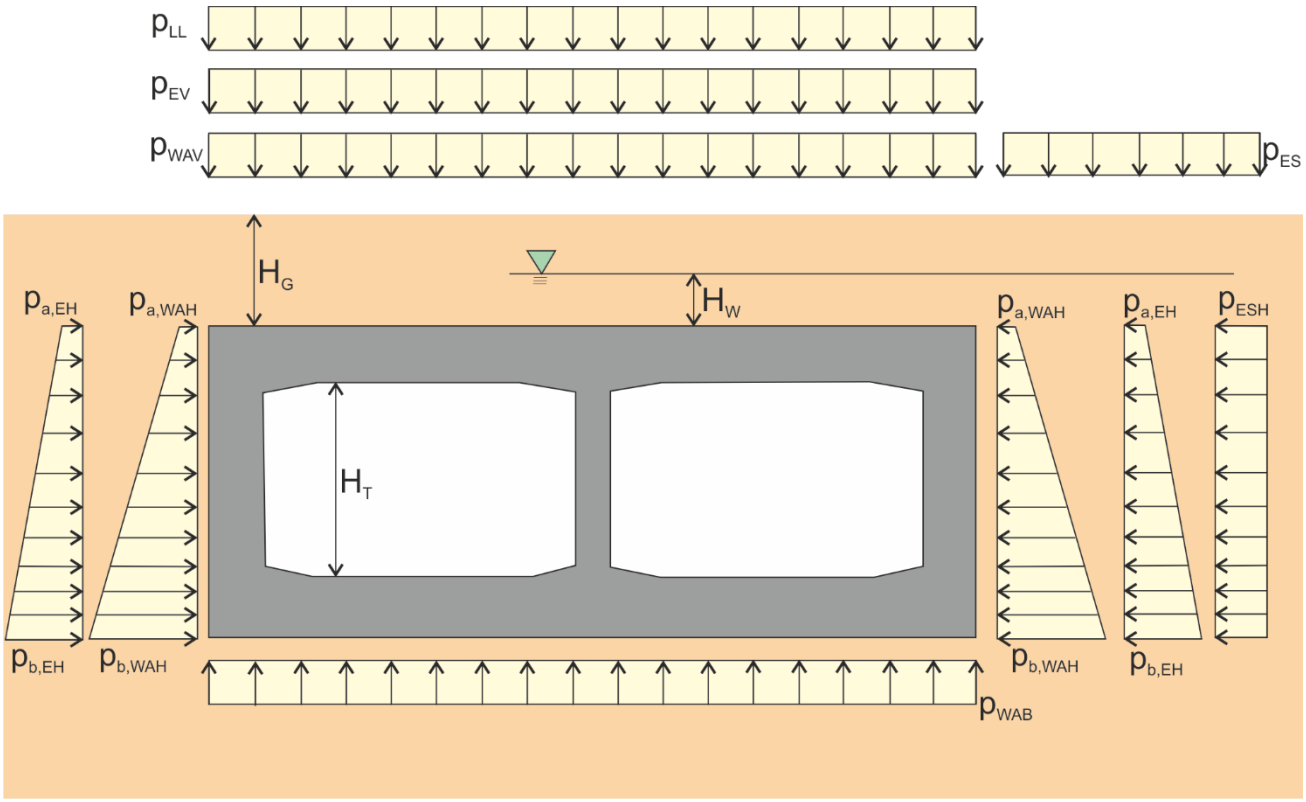
Η γενική σύλληψη αναπτύσσεται από το μελετητή, ο οποίος ως εκ τούτου έχει την ευθύνη συσχέτισης της μελέτης με τις μεθόδους κατασκευής. Εάν υπάρχουν ευκολότερες, φθηνότερες και ταχύτερες μέθοδοι, από εκείνες που προτείνονται ή εξυπακούονται από τη μελέτη, που πληρούν τις συγκεκριμένες απαιτήσεις, θα ασκείται πάντα πίεση αλλαγής της μελέτης που είναι ανεπιθύμητες στη φάση της κατασκευής. Εναρμόνιση της μελέτης με τις μεθόδους κατασκευής απαιτεί γενικά τη στενή συνεργασία των δύο πλευρών. Αυτό, δυστυχώς, δεν συμβαίνει αρκετά συχνά στην πράξη, ειδικά κατά τις φάσεις της προκαταρκτικής μελέτης και της προμελέτης. Συνήθως, σημαντική συμβολή του κατασκευαστή καθίσταται διαθέσιμη μόνο μετά το στάδιο ανάληψης του έργου από τον ανάδοχο. Αυτό μπορεί να ισχύει ακόμη και για συμβάσεις «μελέτη-κατασκευή», ανεξάρτητα από το αν η ομάδα μελέτης είναι εντός του αναδόχου ή εξωτερικός μελετητής. Η εκτίμηση των φορτίων του εδάφους, ιδιαίτερα των πλευρικών που δρουν στο δόμημα, επηρεάζεται από παράγοντες, όπως:

- Επάρκεια γεωτεχνικής διερεύνησης και γεωτεχνικής αξιολόγησης, συμπεριλαμβανομένων των παραμέτρων του εδάφους, της γεωλογικής ιστορίας και των υπόγειων υδάτων.
- Γειτονικά δομήματα. Η φύση της κατασκευής τους και της θέσης τους επηρεάζει τη συνολική προσέγγιση στη διάδραση εδάφους - δομήματος. Γενικά, τα γειτονικά δομήματα από πλαίσια θεμελιωμένα σε πασσάλους είναι λιγότερο ευάλωτα στις επιπτώσεις των κινήσεων του εδάφους που προκαλούνται από το παρακείμενο όρυγμα της σήραγγας. Αντίθετα, δομήματα στην επίγεια επιφάνεια που στηρίζονται σε μεμονωμένα ρηχά πέδιλα, μπορεί να είναι πολύ ευαίσθητα σε αυτές τις μετατοπίσεις.
- Μέθοδοι κατασκευής. Διαφορετικές μέθοδοι, ιδίως σε σχέση με την ταχύτητα της ακολουθίας των εργασιών, τη δυστροπία των προσωρινών έργων, και τον τύπο του εξοπλισμού, επιδρούν διαφορετικά.
- Κινήσεις εδάφους. Γενικά, όσο μεγαλύτερη είναι η αντίσταση ή ο περιορισμός των κινήσεων του εδάφους, τόσο υψηλότερες θα είναι οι φορτίσεις που επιβάλλονται από το έδαφος στο δόμημα. Οι ενσωματωμένοι τοίχοι διακρίνονται σε εκείνους που λειτουργούν ως πρόβολοι και σε αυτούς που αντιστηρίζονται με απλές ή πολλαπλές σειρές αντηρίδων. Οι πρώτοι εξαρτώνται από τον ενεργητικό και παθητικό τρόπο διάδρασης εδάφους - δομήματος, που σχετίζεται με την παραμόρφωση του εδάφους, και η ευστάθειά τους εξαρτάται από την παθητική αντίστασή του. Αυτή δεν είναι η κατάσταση στους τοίχους που αντιστηρίζονται με αντηρίδες, οι οποίοι μπορεί στην αρχή να υποβάλλονται σε ωθήσεις κοντά στις ενεργητικές, αλλά η πίεση από την πλευρά του εδάφους θα τείνει να αυξάνεται προς την κατάσταση ηρεμίας.

11.4.2 Φόρτιση του δομήματος

Ο φορέας της σήραγγας πρέπει να έχει επαρκή αντοχή για να παραλαμβάνει τα φορτία που αναμένεται να δράσουν στη διάρκεια ζωής του. Οι δράσεις οφείλονται σε διαχρονική ανάπτυξη υδροστατικών και εδαφικών πιέσεων καθώς και στην επίδραση γειτονικών εκσκαφών και κατασκευών που πρόκειται να πραγματοποιηθούν. Κάτω από συνήθεις συνθήκες οι φορτίσεις της σήραγγας είναι: η ανάπτυξη εδαφικών και υδατικών πλευρικών πιέσεων, τα νεκρά φορτία συμπεριλαμβανομένου του βάρους της επιχωμάτωσης, η επιφόρτιση στην επίγεια επιφάνεια και τα μεταβλητά και τυχηματικά φορτία. Μπορεί επίσης να υπάρχουν απαιτήσεις για ανάληψη σεισμικών φορτίων. Όταν η στάθμη των υπόγειων υδάτων βρίσκεται πάνω από τον πυθμένα του ανάστροφου ή της πλάκας βάσης του υπόγειου δομήματος, λαμβάνεται υπόψη η άνωση.

Τα φορτία που δρουν στη σήραγγα ανοικτής εκσκαφής, διαφοροποιούνται με βάση τον τρόπο κατασκευής, και τυπικές φορτίσεις δίνονται στο Σχήμα 11-15, για κατασκευή εκ των κάτω προς τα άνω, σύμφωνα με το NHI (2009). Παρακάτω, χρησιμοποιούνται οι ακόλουθοι συμβολισμοί. γ_S: ξηρό μοναδιαίο βάρος του εδάφους, , γ_{Sb}: υπό άνωση μοναδιαίο βάρος του εδάφους, H_G: ύψος τη επίχωσης πάνω από της σήραγγα, H_W: ύψος του υδροφόρου ορίζοντα πάνω από τη σήραγγα, H_T: ύψος του δομήματος της σήραγγας, K_0: συντελεστής πλευρικής πίεσης εδάφους σε ηρεμία.



Σχήμα 11-15. Φορτίσεις σήραγγας ανοικτής εκσκαφής (NHI, 2009) κατασκευασμένη εκ των κάτω προς τα άνω. (1) Κινητό φορτίο (p_{LL}), (2) Κατακόρυφο εδαφικό φορτίο (p_{EV}), (3) Κατακόρυφη υδροστατική πίεση (p_{WAV}), (4) Κατακόρυφη επιφόρτιση (p_{ES}), (5) Οριζόντιο υδροστατικό φορτίο (p_{WAH}), (6) Οριζόντιο φορτίο εδάφους (p_{EH}), (7) Οριζόντιο φορτίο επιφόρτισης(p_{ESH}), (8) Κατακόρυφο υδροστατικό φορτίο άνωσης (p_{WAB}).

Κατά τη μελέτη των σηράγγων ανοικτής εκσκαφής, τα φορτία και οι συνδυασμοί τους, δύνανται να ληφθούν από το EN1991. Τα φορτία διακρίνονται σε: μόνιμα φορτία G, σε μεταβλητά Q, και σε τυχηματικά A. Στον επόμενο πίνακα δίνονται φορτία που ανήκουν στις τρεις κατηγορίες.

Πίνακας 11-1. Ταξινόμηση δράσεων

Μόνιμη δράση G	**Μεταβλητή δράση Q**	**Τυχηματική δράση A**
Ίδιο βάρος δομήματος, εξαρτήματα και πάγιος εξοπλισμός	Επιβαλλόμενα φορτία στο δάπεδο	Έκρηξη
Δύναμη προέντασης	Χιόνι	Πυρκαγιά
Υδατικές και εδαφικές πιέσεις	Άνεμος	Κρούση οχημάτων
Έμμεσες δράσεις, πχ καθίζηση υποστυλωμάτων	Έμμεσες δράσεις, πχ. Θερμοκρασιακές	

Τα μόνιμα φορτία που δρουν στον φορέα της σήραγγας, με βάση τον AASHTO, είναι:

DC = Νεκρό (μόνιμο) φορτίο: Αυτό το φορτίο περιλαμβάνει το ίδιο βάρος των δομικών στοιχείων, καθώς και τα φορτία που σχετίζονται με μη δομικά προσαρτήματα. Μη δομικά προσαρτήματα μπορούν να είναι σήμανση, φωτιστικά, πινακίδες, αρχιτεκτονικά τελειώματα, στεγάνωση, κ.λπ. Τυπικά μοναδιαία βάρη για τα συνήθη δομικά υλικά δίνονται στο EN1991. Βάρη για άλλα στοιχεία υπολογίζονται με βάση τη σύνθεση και τη διάρθρωσή τους.

DW = Νεκρό (μεταβλητό) φορτίο: Αυτό το φορτίο περιλαμβάνει το ίδιο βάρος επικαλύψεων και γραμμών κοινής ωφέλειας. Γραμμές κοινής ωφελείας σε σήραγγες μπορεί να περιλαμβάνουν γραμμές μεταφοράς ενέργειας, σωλήνες αποχέτευσης, γραμμές επικοινωνίας, γραμμές παροχής νερού, κ.λπ. Επικαλύψεις μπορούν να είναι άσφαλτος ή σκυρόδεμα. Τα νεκρά φορτία, λόγω επικάλυψης ή γραμμών κοινής ωφέλειας υπολογίζονται με βάση το πραγματικό μέγεθος και τη διαμόρφωση αυτών των στοιχείων.

EH = Οριζόντια εδαφική πίεση. Οι πληροφορίες που απαιτούνται για τον υπολογισμό αυτού του φορτίου προέρχονται από τα γεωτεχνικά δεδομένα που εξαχθήκανε κατά τη διάρκεια του προγράμματος γεωτεχνικής

έρευνας. Στη μελέτη των σηράγγων ανοικτής εκσκαφής χρησιμοποιείται η πίεση ηρεμίας. Για κατασκευή εκ των κάτω προς τα άνω, η πλευρική πίεση δίνεται από την:

$$p_{a,EH} = \gamma_s \cdot K_0 \cdot (H_G - H_W) + \gamma_{sb} \cdot K_0 \cdot H_W \; ; \; p_{b,EH} = p_{a,EH} + \gamma_{sb} \cdot K_0 \cdot H_T$$

(11-1)

Εξαρτάται από τη φύση του εδάφους μέσα από το οποίο διέρχεται η σήραγγα. Κατά την επιλογή των συντελεστών φόρτισης τα φορτία αυτά θεωρούνται νεκρά. Η θεώρηση της πίεσης αυτής θα πρέπει να γίνεται για βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη φόρτιση. Η μακροπρόθεσμη φόρτιση εκτιμάται αρχικά με βάση τον τύπο και τη μορφολογία του εδάφους. Η βραχυπρόθεσμη φόρτιση είναι σημαντικά μικρότερη της μακροπρόθεσμης, ειδικά δε κατά τη διάνοιξη γειτονικής εκσκαφής υπάρχει ο κίνδυνος ασύμμετρης φόρτισης της σήραγγας. Η βραχυπρόθεσμη φόρτιση υπολογίζεται από τη μακροπρόθεσμη με πολλαπλασιασμό της τελευταίας με ένα μειωτικό συντελεστή (π.χ. 0.5 στο μετρό του Toronto).

EL = Συσσωρευμένη δράση κλειδωμένης δύναμης, που προκύπτει από τη διαδικασία κατασκευής συμπεριλαμβανομένης και της δευτερογενούς δύναμης λόγω μετά-τάνυσης, εφόσον εφαρμόζεται.

ES = Εδαφικό φορτίο επιφόρτισης. Αυτό είναι το κατακόρυφο εδαφικό φορτίο λόγω της επίχωσης που τοποθετείται πάνω από το σχεδιαζόμενο επίπεδο του εδάφους. Συνιστάται να χρησιμοποιείται ένα ελάχιστο φορτίο επιφόρτισης ~20kPa (400 psf). Αν υπάρχει πιθανότητα για μελλοντική ανάπτυξη πάνω από το δόμημα της σήραγγας, κατά τη μελέτη του δομήματος πρέπει να χρησιμοποιείται η πραγματικά αναμενόμενη επιφόρτιση. Στη θέση μιας καλά καθορισμένης φόρτισης, συνιστάται, εφόσον αναμένεται μελλοντική ανάπτυξη, να χρησιμοποιείται μια ελάχιστη τιμή επιφόρτισης~50kPa (1000 psf). Εξαιτίας του φορτίου ES προκύπτει η οριζόντια πίεση:

$$p_{ESH} = K_0 \cdot p_{ES}$$

(11-2)

Το οριζόντιο εδαφικό φορτίο λόγω επιφόρτισης μπορεί να οφείλεται και στο κατακόρυφο φορτίο γειτονικών κτισμάτων, επίγειας κυκλοφορίας ή άλλα επίγεια φορτία (Wilton, 1996), οπότε αυτό θα λαμβάνεται κατάλληλα υπόψη.

EV = Κατακόρυφη πίεση από το νεκρό φορτίο της επίχωσης. Αυτό είναι το κατακόρυφο εδαφικό φορτίο λόγω της επίχωσης μέχρι το σχεδιαζόμενο επίπεδο του εδάφους. Οι πληροφορίες που απαιτούνται για τον υπολογισμό αυτού του φορτίου προέρχονται από τα γεωτεχνικά δεδομένα που εξαχθήκανε κατά τη διάρκεια του προγράμματος γεωτεχνικής έρευνας. Η πίεση υπολογίζεται με πολλαπλασιασμό του βάθους επίχωσης με το μοναδιαίο βάρος του συμπυκνωμένου ή υπό άνωση εδάφους, σύμφωνα με την:

$$p_{EV} = \gamma_s \cdot (H_G - H_W) + \gamma_{sb} \cdot H_W$$

(11-3)

Μεταβλητά και τυχηματικά φορτία, σύμφωνα με τον AASHTO, που δύνανται να δρουν στις σήραγγες ανοικτής εκσκαφής είναι:

CR = Ερπυσμός.

CT = Δύναμη σύγκρουσης οχημάτων: Αυτό το φορτίο εφαρμόζεται σε μεμονωμένα συστατικά του δομήματος της σήραγγας που θα μπορούσαν να καταστραφούν από σύγκρουση οχημάτων. Συνήθως, τα τοιχώματα της σήραγγας είναι πολύ μεγάλης μάζας ή προστατεύονται από εμπόδια ανακατεύθυνσης, ώστε το φορτίο αυτό να μη χρειάζεται να εξετάζεται υπό συνήθεις περιστάσεις. Προτιμότερο είναι να σχεδιάζονται λεπτομερώς τα συστατικά της σήραγγας, έτσι ώστε να μην υπόκεινται σε βλάβη από πρόσκρουση οχημάτων.

EQ = Σεισμός. Αυτό το φορτίο θα πρέπει να εφαρμόζεται στην επένδυση της σήραγγας σύμφωνα με τη σεισμική ζώνη που βρίσκεται η σήραγγα. Σεισμικά φορτία (E_Q) συνήθως δεν επηρεάζουν τη διαστασιολόγηση της σήραγγας. Τα περισσότερα εδάφη είναι πολύ πιο δύσκαμπτα από την κατασκευή της σήραγγας, έτσι ώστε να μην μπορεί να γίνει δομική αστοχία ως αποτέλεσμα σεισμικών μετακινήσεων. Σε περίπτωση που αναμένονται σεισμικές δυνάμεις, η κατασκευή θα πρέπει να έχει επαρκή πλαστιμότητα.

IM = Δυναμικό φορτίο οχημάτων: Το φορτίο αυτό μπορεί να ισχύει για τις πλάκες οδοστρώματος των σηράγγων και μπορεί να επίσης να εφαρμόζεται στην πλάκα οροφής της σήραγγες που κατασκευάζεται κάτω από δρόμους, σιδηροδρομικές γραμμές, λεωφόρους ή άλλες εγκαταστάσεις που φέρουν κινούμενα οχήματα.

LL = Κινητό φορτίο οχημάτων: Κινητά φορτία για τις πλάκες οδοστρώματος μέσα στη σήραγγα περιλαμβάνουν φορτία πεζών, φορτία αυτοκινήτων και τραίνων, καθώς και φορτία μετακίνησης εξοπλισμού. Σε σήραγγα ενός ορόφου τα φορτία πεζών, οχημάτων ή μετακίνησης εξοπλισμού, καθώς και τα CE (φυγόκεντρα), RF (κύλισης), BR (πέδησης), συνήθως δε χρειάζεται να λαμβάνονται υπόψη, επειδή τα φορτία αυτά μεταβιβάζονται μέσω του ανάστροφου τόξου κατ' ευθείαν στο έδαφος. Φορτίο κινητό μπορεί να δρα επίσης στην πλάκα οροφής των σηράγγων που κατασκευάζονται κάτω από δρόμους, σιδηροδρομικές γραμμές, λεωφόρους ή άλλες εγκαταστάσεις που φέρουν κινούμενα οχήματα. Το φορτίο αυτό διανέμεται μέσω της επίχωσης στην οροφή της σήραγγας, εκτός αν η κυκλοφορία πραγματοποιείται απευθείας στην οροφή της σήραγγας. Σήραγγες που διέρχονται κάτω από αστικές οδούς πρέπει να σχεδιάζονται έτσι ώστε να επιτρέπουν τη διέλευση ιδιαίτερα βαρέων οχημάτων, τα φορτία των οποίων προσδιορίζονται από σχετικές προδιαγραφές.

SH = Συρρίκνωση. Το δόμημα των σηράγγων κοπής και επίχωσης είναι σχετικά ογκώδες, και γι' αυτό η συρρίκνωση δύναται να δημιουργεί πρόβλημα, ιδίως εάν οι εξωτερικές επιφάνειες παρεμποδίζονται στη μετατόπιση. Αυτό το φορτίο θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στη μελέτη, ή το δόμημα πρέπει να σχεδιάζεται σε λεπτομερώς για την ελαχιστοποίηση ή την εξάλειψή της.

TG = Βάθμωση θερμοκρασίας. Το δόμημα των σηράγγων κοπής και επίχωσης κατασκευάζεται συνήθως από σκυρόδεμα, το οποίο έχει μεγάλη θερμική υστέρηση. Σε συνδυασμό με το γεγονός ότι περιβάλλεται από μία μονωτική επίχωση που διατηρεί μια σχετικά σταθερή θερμοκρασία, η κλίση της θερμοκρασίας κατά το πάχος του δομήματος της σήραγγας μπορεί να είναι μετρήσιμη. Το φορτίο αυτό θα πρέπει να εξετάζεται κατά περίπτωση, ανάλογα με το τοπικό κλίμα και τις εποχιακές διακυμάνσεις της μέσης θερμοκρασίας.

TU = Ομοιόμορφη θερμοκρασία. Το φορτίο αυτό χρησιμοποιείται κυρίως για την εκτίμηση του μεγέθους των αρμών διαστολής του δομήματος. Εφόσον επιτρέπεται η μετακίνηση στους αρμούς διαστολής, δεν απαιτείται γενικά καμία πρόσθετη φόρτιση στο δόμημα. Συνήθης είναι η πρακτική κατασκευής με τοποθέτηση αρμών διαστολής κάθε 15 m περίπου κατά μήκος της σήραγγας.

WA = Φορτίο νερού. Το φορτίο αυτό αντιπροσωπεύει την υδροστατική πίεση που αναμένεται εκτός της σήραγγας. Τα δομήματα των σηράγγων συνήθως είναι στεγανά χωρίς πρόβλεψη για την ανακούφιση της υδροστατικής πίεσης. Ως εκ τούτου, η σήραγγα υπόκειται σε οριζόντια υδροστατική πίεση W_H στα πλευρικά τοιχώματα, κατακόρυφη υδροστατική πίεση W_V στην οροφή και δύναμη άνωσης W_B στο δάπεδο. Η υδροστατική πίεση δρα κάθετα προς την επιφάνεια της σήραγγας. Πρέπει να θεωρείται ότι η υδροστατική πίεση θα αναπτυχθεί πλήρως στα τοιχώματα της σήραγγας, την οροφή και το δάπεδο. Η μελέτη πρέπει να λαμβάνει υπόψη το μοναδιαίο βάρος του υπόγειου νερού, που μπορεί να είναι αλμυρό. Η πίεση του νερού στην οροφή, στα πλευρά και κάτω από το δάπεδο, δίνονται από τις:

$$p_{WAV} = \gamma_w \cdot H_W \tag{11-4}$$

$$P_{a,WAH} = \gamma_W \cdot H_W;\ p_{b,WAH} = \gamma_W \cdot (H_W + H_T) \tag{11-5}$$

$$p_{WAB} = \gamma_W \cdot (H_W + H_T) \tag{11-6}$$

Μέγιστο και ελάχιστο υδροστατικό φορτίο πρέπει να χρησιμοποιείται κατά τους υπολογισμούς. Στη μελέτη, οι υδροστατικές πιέσεις που θεωρούνται ότι εφαρμόζονται σε υπόγειες κατασκευές πρέπει να αγνοούν την εκτόνωση της πίεσης πόρων που συμβαίνει λόγω διαρροής μέσα από το δόμημα, εκτός εάν έχει εγκατασταθεί

και διατηρείται ένα κατάλληλα σχεδιασμένο σύστημα εκτόνωσης της πίεσης. Πρέπει να εξετάζονται δύο επίπεδα ορίζοντα υπογείων υδάτων: κανονικός (παρατήρηση μέγιστης στάθμης των υπόγειων υδάτων) και ακραία, 1 m πάνω από το επίπεδο σχεδιασμού πλημύρας (100 έως 200 ετών). Το φορτίο λόγω υδροστατικής πίεσης υπολογίζεται σύμφωνα με το βάθος της σήραγγας ως προς τον υδροφόρο ορίζοντα. Η άνωση, είναι η διαφορά μεταξύ του υδροστατικού φορτίου στην οροφή και κάτω από το δάπεδο, δηλαδή η συνολική δύναμη άνωσης, σύμφωνα με τον Αρχιμήδη, ισούται με το βάρος του εκτοπιζόμενου νερού. Οι υπολογισμοί για την άνωση πρέπει να βασίζονται στις ελάχιστες χαρακτηριστικές πυκνότητες των υλικών και τη μέγιστη πυκνότητα του νερού.

11.4.3 Συνδυασμοί φορτίων

Κατά το σχεδιασμό των φορέων της σήραγγας όλα τα δρώντα φορτία θα πρέπει να θεωρηθούν ότι δρουν σε συνδυασμούς που προκαλούν τα δυσμενέστερα αποτελέσματα. Συνήθεις συνδυασμοί περιλαμβάνουν τα μόνιμα φορτία και συμμετρικά ή ασύμμετρα μακροχρόνια ή βραχυχρόνια πλευρικά φορτία. Τα φορτία πολλαπλασιάζονται με επιμέρους συντελεστές ασφαλείας και συνδυάζονται σύμφωνα με τις προδιαγραφές του EN1991, και εφαρμόζονται στο φορέα της σήραγγας. Ο Πίνακας 11-2 δίνει απαραίτητους συνδυασμούς φορτίσεων σύμφωνα με τον AASHTO.

Πίνακας 11-2. Συνδυασμοί φορτίσεων (NHI, 2009)

Συνδυασμός φορτίσεων οριακής κατάστασης	**DC**		**DW**		**EH* EV#**		**ES**		**EL**	**LL, IM**	**WA**	**TU, CR, SH**		**TG**
	Max	**Min**	**Max**	**Min**	**Max**	**Min**	**Max**	**Min**				**Max**	**Min**	
Αντοχή I	1.25	0.90	1.50	0.65	1.35	0.90	1.50	0.75	1.00	1.75	1.00	1.20	0.50	0.00
Αντοχή II	1.25	0.90	1.50	0.65	1.35	0.90	1.50	0.75	1.00	1.35	1.00	1.20	0.50	0.00
Αντοχή III	1.25	0.90	1.50	0.65	1.35	0.90	1.50	0.75	1.00	0.00	1.00	1.20	0.50	0.00
Λειτουργία I	1.00		1.00		1.00		1.00		1.00	1.00	1.00	1.20	1.00	0.50
Λειτουργία IV	1.00		1.00		1.00		1.00		1.00	0.00	1.00	1.20	1.00	1.00
Λειτουργία IVA**	0.00		0.90		0.90		0.90		0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
Ακραίο περιστατικό I	1.25	0.90	1.50	0.65	1.35	0.90	1.50	0.75	γEQP^{+}	1.00	N/A	N/A	N/A	N/A

• * *Οι συντελεστές φορτίου που δίνονται είναι για εδαφική πίεση ηρεμίας. Εδαφική πίεσης ηρεμίας πρέπει να χρησιμοποιείται για όλες τις περιπτώσεις μελέτης των φορέων σηράγγων ανοικτής εκσκαφής. Οριζόντια εδαφική πίεση δεν χρησιμοποιείται για το συνδυασμό φορτίσεων IVA.*
• # *Οι συντελεστές φορτίου που δίνονται είναι για άκαμπτα πλαίσια. Όλοι οι φορείς των σηράγγων ανοικτής εκσκαφής θεωρούνται άκαμπτα πλαίσια.*
• + *Αυτός ο συντελεστής φορτίου καθορίζεται κατά περίπτωση έργου και δεν εμπίπτει στο πεδίο εφαρμογής του NHI (2009).*
• ** *Αυτή η περίπτωση φορτίου χρησιμοποιείται για τον έλεγχο πλευστότητας των σηράγγων που βρίσκονται κάτω από τη μόνιμη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα.*

Σε ορισμένες περιπτώσεις, η απουσία ωφέλιμων φορτίων μπορεί να είναι η δυσμενέστερη φόρτιση. Για παράδειγμα, το ωφέλιμο φορτίο μπορεί να μειώσει τις επιπτώσεις της άνωσης. Ο Πίνακας 11-2 εμφανίζει τον έλεγχο έναντι άνωσης ως λειτουργικότητας IVA. Η δύναμη άνωσης θα πρέπει να εξασφαλίζεται ότι είναι μικρότερη από τη δράση του μόνιμου νεκρού φορτίου. Συχνά, το μέγεθος των δομικών στοιχείων ή/και το πλάτος της πλάκας βάσης πρέπει να αυξάνονται, ώστε να εξασφαλίζεται από τα νεκρά φορτία η αντίσταση έναντι της άνωσης. Εναλλακτικά, το δόμημα θα πρέπει να συγκρατείται από βαθύτερα σημεία με εφελκυόμενους πασσάλους ή αγκύρια συγκράτησης. Επιδράσεις της αντίστασης που απαιτείται για την απόσπαση του υλικού πάνω από τη σήραγγα δεν λαμβάνονται υπόψη. Γενικά, εφαρμόζεται κάθε δυνατός συνδυασμός συντελεστών φόρτισης, χρησιμοποιώντας την κρίση του μηχανικού.

11.4.4 Όργανα και παρακολούθηση

Όποιο και αν είναι το επίπεδο της λεπτομέρειας κατά τη στατική ανάλυση, είναι αδύνατη η πρόβλεψη με ακρίβεια των μετατοπίσεων του εδάφους και του δομήματος. Σκόπιμη είναι η εγκατάσταση ενός συστήματος

παρακολούθησης κατά τη διάρκεια της κατασκευής, για την επιβεβαίωση της μελέτης και για τον έλεγχο της ασφάλειας. Σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως σε διογκούμενες ή στερεοποιούμενες αργίλους, η παρακολούθηση των κινήσεων πρέπει να συνεχίζεται πέραν της ολοκλήρωσης της κατασκευής, ιδιαίτερα αν οι μακροπρόθεσμες κινήσεις μπορούν να επηρεάσουν τις εσωτερικές διαστάσεις των ανοιγμάτων, την ευθυγράμμιση σιδηροτροχιών και την αποχέτευση. Προς τούτο, θα πρέπει να συμπεριλαμβάνονται, κατά τη μελέτη, επαρκείς πρόσθετες ανοχές.

Πρέπει να πραγματοποιούνται απλές, άμεσες μέθοδοι παρακολούθησης, όπως χωροσταθμήσεις, κλισιμετρήσεις, και μηκομετρήσεις,. Τέτοιες μέθοδοι είναι γρήγορες και επαναλαμβανόμενες και γενικά επαρκώς ευαίσθητες για να δείχνουν τις τάσεις μετατόπισης, αρκεί να εξασφαλίζεται η ακεραιότητα των σημείων αναφοράς, που πρέπει να είναι επαρκώς απομακρυσμένα από το δόμημα ώστε να μην επηρεάζονται από αυτό. Μετατοπίσεις που προκύπτουν από μεγάλες εκσκαφές εδάφους, μπορεί να εκτείνονται πολύ πέραν του εκσκαμμένου χώρου. Για παράδειγμα, καθιζήσεις μπορεί να συμβούν σε απόσταση τρεις έως τέσσερις φορές το βάθος του ορύγματος.

Οι παραπάνω, ουσιαστικά οπτικές μέθοδοι δεν μπορούν, ωστόσο, να παρέχουν μια ολοκληρωμένη εκτίμηση των τροπών και των τάσεων, εντός του δομήματος και του περιβάλλοντος εδάφους. Όπου αυτή κρίνεται απαραίτητη, οι μέθοδοι αυτές θα πρέπει να συνδυάζονται με ενσωματωμένα όργανα που μπορεί να περιλαμβάνουν ένα συνδυασμό από μετρητές παραμόρφωσης, αποκλισιόμετρα και κύτταρα φορτίου. Τα όργανα αυτά τοποθετούνται κατάλληλα στο νέο δόμημα, στο περιβάλλον έδαφος και στα παρακείμενα δομήματα.

11.5 Μόνιμος φορέας

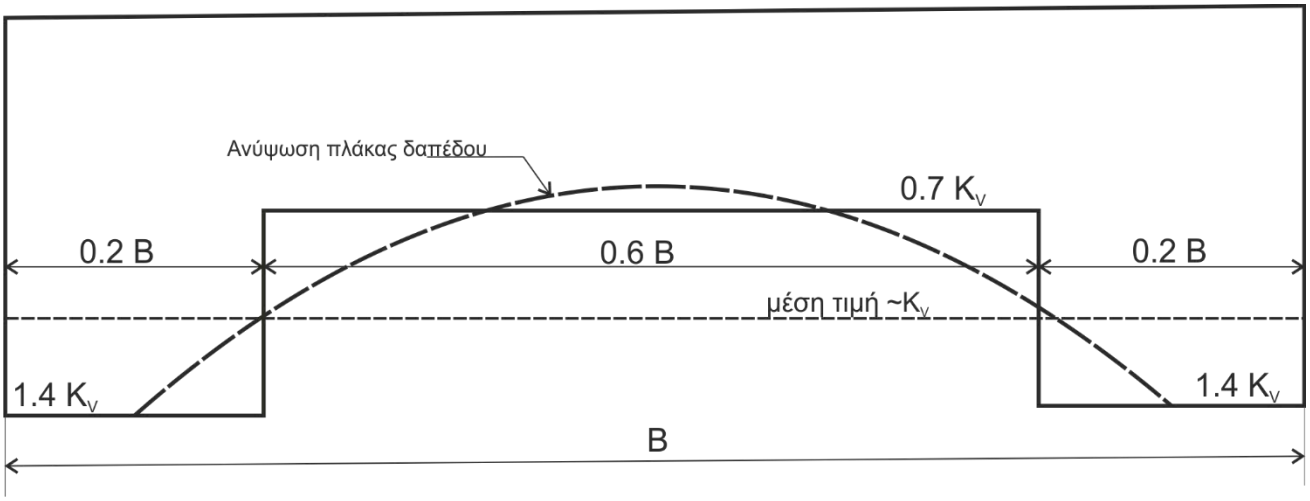
11.5.1 Θεμελίωση της σήραγγας

Η θεμελίωση της σήραγγας πρέπει να είναι επαρκής έναντι της φέρουσας ικανότητας του εδάφους και έναντι καθιζήσεων. Η φέρουσα ικανότητα συνήθως δεν είναι κρίσιμη. Η ποιότητα του εδάφους τείνει να αυξάνεται με το βάθος και το επιβαλλόμενο φορτίο των υπερκειμένων συνήθως, αν δεν μειώνεται σε σχέση με το προϋπάρχον, δεν το ξεπερνά σημαντικά. Επομένως, αυτό που έχει ενδιαφέρον συνήθως είναι η επαγόμενη καθίζηση ή ανύψωση. Προς τούτο εξετάζονται οι επιτρεπόμενες πιέσεις στο έδαφος, για θεμελίωση σε: θεμελιοδοκούς, κοιτοστρώσεις και πασσάλους, και η επιλογή τους προσδιορίζεται με βάση τις εδαφικές συνθήκες, τις μεθόδους κατασκευής, και το κόστος.

Η θεμελιοδοκός είναι οι οικονομικότερη θεμελίωση. Εφαρμόζεται σε παραδοσιακούς τοίχους αντιστήριξης και πλαίσια, ύψους μέχρι ~8m, εφόσον το υπέδαφος προσφέρει επαρκή φέρουσα ικανότητα για τη δοκό και το οδόστρωμα. Πρέπει να εξετάζεται ο κίνδυνος καθιζήσεων λόγω μακροχρόνιας μαλάκυνσης της αργίλου ή της απώλειας λεπτοκόκκων των κοκκωδών εδαφών. Στις προστερεοποιημένες αργίλους με υψηλό δείκτη πλαστικότητας, εφόσον υπάρχει σημαντική μείωση της πίεσης των υπερκειμένων, υπάρχει ο κίνδυνος διόγκωσης. Σε αυτές τις αργίλους το οδόστρωμα ούτως ή άλλως θα υποστεί κάποια διόγκωση, καθόσον θα υπάρξει οπωσδήποτε αποφόρτιση του εδάφους μεταξύ των θεμελιοδοκών. Μια μικρή μακροχρόνια διόγκωση θα μπορούσε να αναληφθεί από ένα εύκαμπτο οδόστρωμα ή έρμα τροχιάς. Αντίθετα, δεν μπορεί να αναληφθεί από την πλάκα σκυροδέματος σταθερής επιδομής (slab track), που εφαρμόζεται πλέον στους υπόγειους σιδηροδρόμους.

Η γενική κοιτόστρωση μεταφέρει το συνολικό κατακόρυφο φορτίο στο έδαφος. Η κατανομή της κατακόρυφης πίεσης, λόγω των κατακόρυφων φορτίων, αναμένεται να έχει τα κοίλα προς τα άνω (Σχήμα 11-16). Ο βαθμός καμπυλότητας εξαρτάται από τη δυσκαμψία της κοιτόστρωσης σε σχέση με του εδάφους. Όσο μεγαλύτερη η καμπυλότητα, τόσο μικρότερη η μέγιστη ροπή στην πλάκα. Η παραδοχή ότι η αντίδραση στα κατακόρυφα φορτία είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη στην πλάκα του δαπέδου, προκαλεί τις μέγιστες ροπές στο μέσον της πλάκας και είναι συντηρητική. Γι' αυτό κατά τη στατική μελέτη λαμβάνεται υπόψη η αλληλεπίδραση κατασκευής και εδάφους που έχει ως αποτέλεσμα συνήθως τη μεγαλύτερη φόρτιση της κατασκευής στα άκρα. Στο Σχήμα 11-16 φαίνεται η κατανομή της κατακόρυφης δυσκαμψίας (Winkler) του εδάφους, όπως αυτή προτάθηκε από τους μελετητές, κάτω από το σταθμό του Αττικό Μετρό στο Πεντάγωνο. Οι διατομές του σκυροδέματος και ο απαιτούμενος οπλισμός διαστασιολογούνται, εν συνεχεία, με βάση τα διαγράμματα ροπών, ορθών και τεμνουσών δυνάμεων. Αντίθετα, η υδροστατική πίεση ή η πίεση λόγω διόγκωσης έχουν ομοιόμορφη κατανομή. Εφόσον οι τελευταίες αυτές πιέσεις είναι σημαντικές και το βάθος

εμπέδωσης των τοίχων μεγάλο, πρέπει να εξετάζεται η ανάρτηση της πλάκας από τα τοιχώματα. Το στατικό κενό κάτω από την πλάκα διαμορφώνεται είτε με το γέμισμά του με χαμηλού μέτρου παραμορφωσιμότητας πολυστερίνη είτε με χρήση κατάλληλου μεταλλότυπου.



Σχήμα 11-16. Κατανομή της δυσκαμψίας του εδάφους κάτω από σήραγγα που κατασκευάζεται σε ανοικτή εκσκαφή, Σταθμός Πεντάγωνο, Αττικό Μετρό.

Πάσσαλοι αιχμής ή τριβής δύνανται να τοποθετούνται κάτω από τους περιφερειακούς τοίχους, καθώς και κάτω από αναρτημένες πλάκες. Απαιτούνται εκεί όπου τα κατακόρυφα φορτία είναι πολύ υψηλά ή για να στηριχτούν οι τοίχοι σε στέρεο έδαφος. Τα υψηλά φορτία προκύπτουν είτε από υψηλή επίχωση είτε λόγω ανάπτυξης δομημένου χώρου πάνω από το υπόγειο έργο.

Εφόσον η συνισταμένη δύναμη στο δόμημα της σήραγγας έχει φορά προς τα πάνω, ειδικά σε αργιλικά εδάφη λόγω της μείωσης του κατακόρυφου φορτίου, απαιτούνται εφελκυόμενοι πάσσαλοι συγκράτησής του. Αυτή η δύναμη εφελκυσμού αναλαμβάνεται από την αντίσταση τριβής του πασσάλου που αντιτίθεται στην ανύψωση. Τούτο απαιτεί σημαντικό οπλισμό στον πάσσαλο σε σχέση με τις ελάχιστες απαιτήσεις. Οι πάσσαλοι των τοίχων με βαθιά εμπέδωση δύνανται επίσης να υφίστανται κάμψη που δεν δρα συγχρόνως με τον εφελκυσμό. Σε αυτήν την περίπτωση (Powderham, 1990), ο οπλισμός τους λόγω κάμψης επαρκεί συνήθως για την ανάληψη των εφελκυστικών δυνάμεων.

11.5.2 Δόμημα της σήραγγας

Το δόμημα κατασκευάζεται από οπλισμένο σκυρόδεμα, στο οποίο η στερέωση του οπλισμού και η τοποθέτηση του σκυροδέματος πρέπει να διευκολύνονται. Η χρήση μεσαίας διαμέτρου οπλισμού πρέπει να μεγιστοποιείται, καθόσον οι λεπτές ράβδοι χρειάζονται σημαντική στήριξη και οι μεγάλες διάμετροι χρειάζονται μεγάλο μήκος επικάλυψης και είναι δύσκολο να καμφθούν. Στις παχιές διατομές (άνω των 500mm), οι οποίες είναι συνήθεις, η εκτεταμένη χρήση διατμητικού οπλισμού πρέπει να αποφεύγεται. Ο οπλισμός ρωγμάτωσης πρέπει να τοποθετείται εκτός του φέροντος οπλισμού.

Τα υλικά σύνθεσης του σκυροδέματος επιλέγονται από αυτά που είτε είναι διαθέσιμα τοπικά είτε εύκολα εφοδιάζονται. Ο σχεδιασμός της μείξης των επιμέρους συστατικών του σκυροδέματος αποβλέπει στη δημιουργία υλικού που να ικανοποιεί τις απαιτήσεις για αντοχή, ανθεκτικότητα και στεγανότητα. Η πλήρης μείξη των συστατικών αυτών είναι απαραίτητη προκειμένου να επιτυγχάνεται ομοιομορφία στην αντοχή, ανθεκτικότητα, στεγανότητα και εργασιμότητα. Στη δημιουργία ανθεκτικού δομήματος συντελούν η σύνθεση του μίγματος, η επικάλυψη του οπλισμού, η συμπύκνωση και η ωρίμαση. Η κατάλληλη σύνθεση επιτυγχάνεται, εκτός των άλλων, με τη χρήση σύνθετων τσιμέντων με σκωρία ή ιπτάμενη τέφρα και τη χρήση υπερρευστοποιητών, ώστε για χαμηλούς λόγους W/C να προκύπτει η απαιτούμενη εργασιμότητα. Ειδικά μέτρα απαιτούνται όταν το δόμημα εκτίθεται σε υψηλές υδατικές πιέσεις παρουσία χλωριόντων και θειικών, όπως είναι η χρήση κατάλληλων μεμβρανών προστασίας, η καθοδική προστασία, και η επίχριση του οπλισμού με εποξικές ρητίνες.

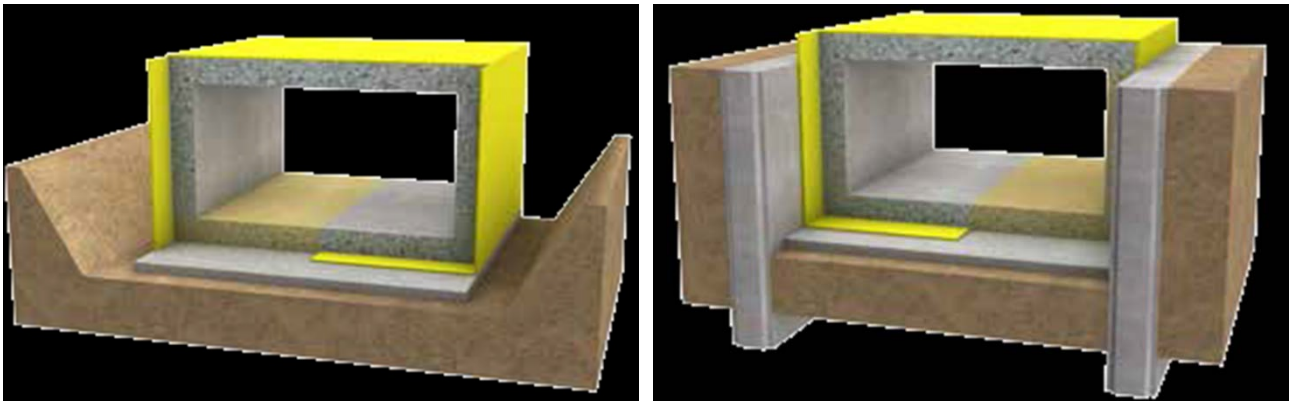
Κατά τη μεταφορά και τοποθέτηση του σκυροδέματος πρέπει να δίνεται προσοχή στη μη απόμειξη των αδρομερών αδρανών από τη τσιμεντόπαστα ή εξίδρωση του νερού στην επιφάνεια. Οι τύποι (καλούπια) μέσα

στους οποίους εγχέεται το νωπό σκυρόδεμα θα πρέπει να είναι άκαμπτοι και σχεδιασμένοι έτσι ώστε να μη μετακινούνται ή κάμπτονται κάτω από το βάρος ή την πίεση του σκυροδέματος. Η συμπύκνωση του σκυροδέματος γίνεται συνήθως με δονητές. Εφόσον απαιτείται σκυροδέτηση κάτω από το νερό χρησιμοποιείται η μέθοδος tremie, δηλαδή η έγχυση του ρευστού σκυροδέματος στο βαθύτερο σημείο σκυροδέτησης μέσω μίας σωλήνας. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται όταν η σκυροδέτηση γίνεται σε θερμοκρασιακές συνθήκες ιδιαίτερα ψυχρές ή θερμές.

11.5.3 Αρμοί και στεγάνωση

Η αδιαπερατότητα εξασφαλίζεται πρώτιστα από στεγανό σκυρόδεμα. Το γερμανικό πρότυπο Ril 853, ανάλογα με τη χρήση του έργου, απαιτεί διαφορετικά επίπεδα στεγανότητας· χωρικά διακρίνονται σε δύο διαφορετικά επίπεδα οι θέσεις χρήσης και οι ενδιαίτησης. Οι σταθμοί μετρό είναι θέσεις ενδιαίτησης, και εντάσσονται στην κατηγορία 1 στεγανότητας, ενώ οι σήραγγες μετρό είναι θέσεις χρήσης που εντάσσονται στην κατηγορία 3. Η κατηγορία 1 (σταθμοί μετρό) απαιτεί απόλυτη ξηρότητα, δηλαδή δεν επιτρέπει καμία διήθηση ή νοτισμένες επιφάνειες. Η κατηγορία 3 (σήραγγες μετρό) επιτρέπει πολύ μικρή διήθηση αρχικά (0.1-0.5 $l/m^2/24$ h σύμφωνα με την STUVA), που πραγματοποιείται μέσα από θερμικές ή καμπτικές ρωγμές. Η μελέτη πρέπει να περιορίζει το άνοιγμα τέτοιων ρωγμών στα 0.2mm. Στο άνοιγμα αυτό οι ρωγμές τείνουν στην αυτογενή σφράγιση κατά τους πρώτους μήνες της διήθησης.

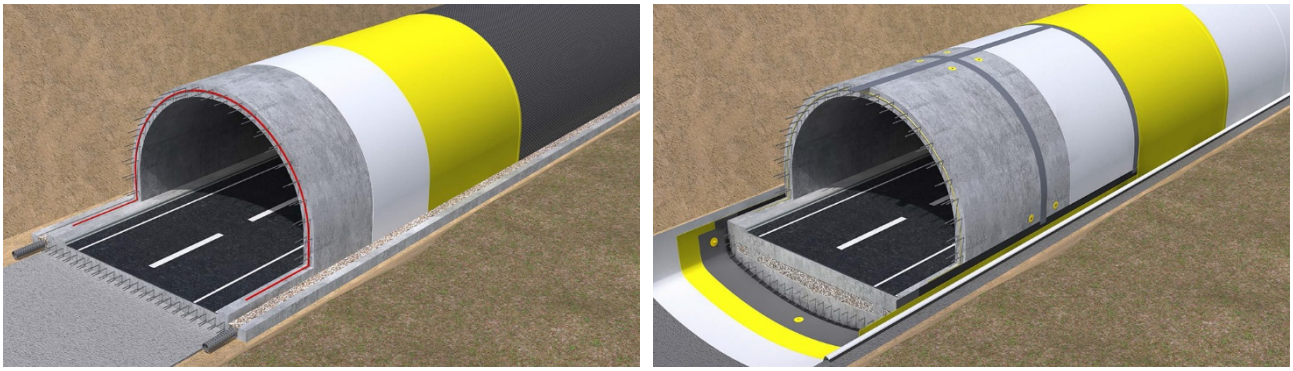
Όταν η σήραγγα βρίσκεται πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα, η υδατοστεγάνωση της εξασφαλίζεται συχνά καλύτερα με την προδιαγραφή σκυροδέματος C30 με χαμηλό λόγο W/C και επιμελημένη τοποθέτηση που να εξασφαλίζει ένα πυκνό, ομοιογενές, υψηλής ποιότητας σκυρόδεμα. Η εμπειρία έχει δείξει ότι οι εξωτερικοί τοίχοι και πλάκες πρέπει να έχουν ελάχιστο πάχος 60 cm. Εφόσον τοποθετούνται αρμοί διαστολής ανά 12 έως 20 m κατά μήκος της σήραγγας για την πρόληψη ρωγματώσεων συρρίκνωσης ή θερμοκρασίας, τότε αυτά τα τοιχία και πλάκες αναμένεται να είναι υδατοστεγανά. Ο Powderham (1990) προτείνει να μην κατασκευάζονται στα δομήματα αυτά αρμοί διαστολής, καθόσον κρίνει ότι το συνολικό αποτέλεσμα των παραμορφώσεων λόγω θερμοκρασίας και συστολής ξήρανσης δεν είναι κρίσιμο και αυτές οι παραμορφώσεις δύνανται να αναλαμβάνονται επαρκώς από το διαμήκη οπλισμό που απαιτείται για τον έλεγχο της θερμικής ρωγμάτωσης του νεαρού σκυροδέματος· θεωρεί ότι κίνδυνος από θερμοκρασιακές μεταβολές και κύκλους τήξης-πήξης, υφίσταται μόνο στα στόμια της σήραγγας.



(α) Διατομή σήραγγας εντός κεκλιμένων πρανών *(β) Διατομή σήραγγας εντός κατακόρυφων πρανών*

Σχήμα 11-17. Στεγανοποίηση σήραγγας εκτός του φορέα σκυροδέματος (Sika, -β)

Όταν η σήραγγα βρίσκεται κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα, απαιτείται καλός σχεδιασμός και η καλή ποιότητα της κατασκευής για την ελαχιστοποίηση των διαρροών. Πολλές προδιαγραφές απαιτούν πλήρη υδατοστεγανότητα της σήραγγας αμέσως μετά την κατασκευή του σκυροδέματος. Προς τούτο, περιμετρικά έξω από την τελική επένδυση (Σχήμα 11-17) τοποθετείται στεγανοποιητική μεμβράνη και υδρομαστευτικό γεωΰφασμα· λεπτομέρειες του συστήματος απεικονίζονται στο Σχήμα 11-18. Άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι οι ασφαλτικές ή εποξικές επικαλύψεις.

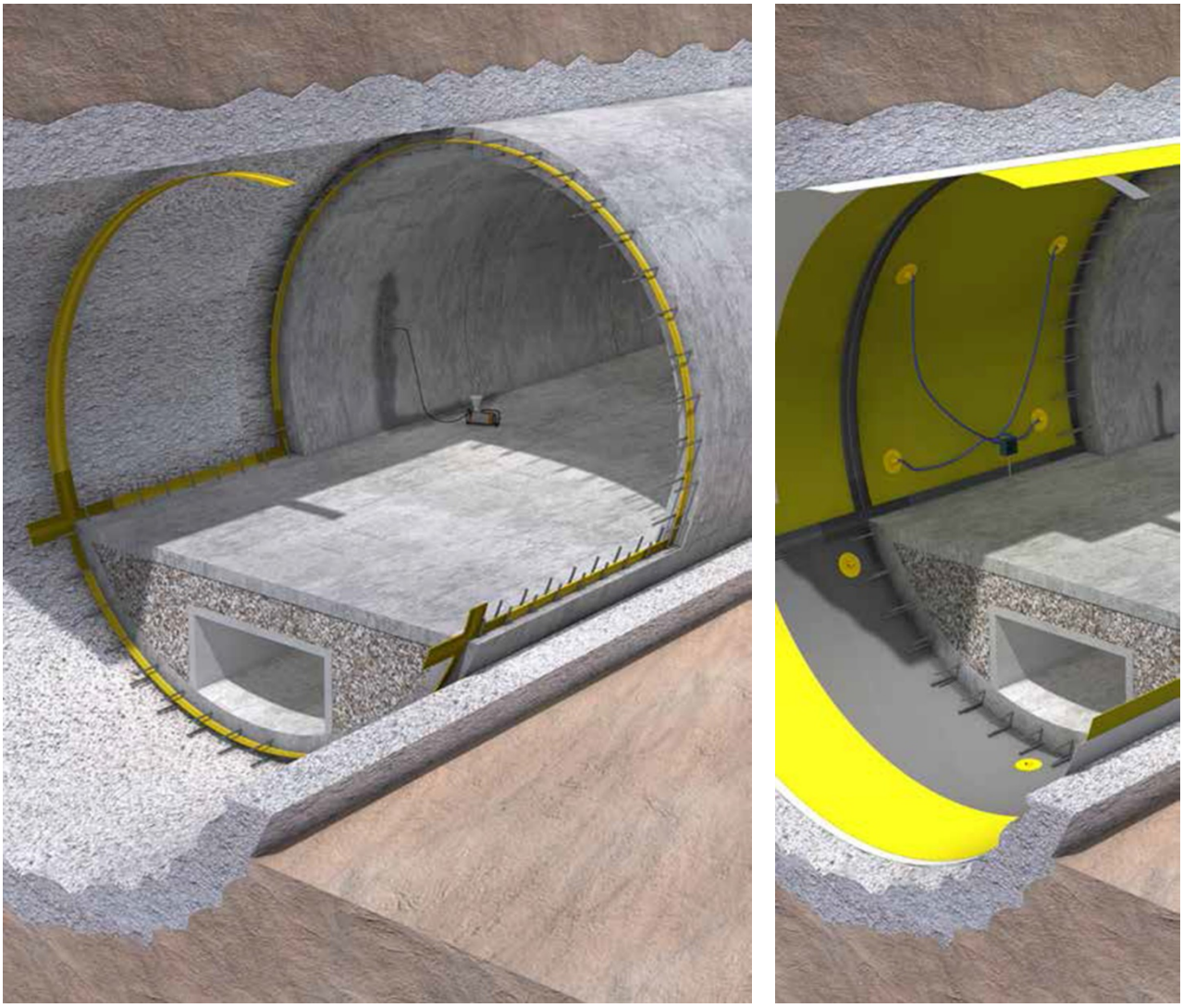


(α) Υδρομάστευση και υδατοστεγάνωση οροφής και παρειών

(β) Υδατοστεγάνωση όλης της διατομής

Σχήμα 11-18. Στρώσεις στεγάνωσης και υδρομάστευσης σηράγγων (Sika. - α)

Όταν υφίστανται διαρροές, αυτές αναμένονται στους αρμούς διαστολής. Αυτοί οι αρμοί είναι απαραίτητοι για να επιτρέπεται η μετακίνηση λόγω συστολής ξήρανσης ή θερμοκρασιακής διαστολής. Οι μεταβολές της θερμοκρασίας στα υπόγεια έργα αναμένεται να είναι κατά πολύ μικρότερες από τις αντίστοιχες στην επίγεια επιφάνεια, και επομένως το απαιτούμενο πάχος του αρμού πολύ μικρότερο, π.χ. της τάξης των 8 mm.



(α) Σύστημα υδατοστεγανού σκυροδέματος

(β) Σύστημα μεμβρανών

Σχήμα 11-19. Έργα αποκατάστασης με ενέσεις (Sika, - β)

Οι αρμοί θα πρέπει να διαμορφώνονται με μία προσχηματισμένη γόμωση (joint filler) και να κλείνουν με ένα φραγμό ύδατος (water stop) από πολυβινύλιο (PVC). Ο σχεδιασμός του φραγμού και ο τρόπος τοποθέτησης του σκυροδέματος κατά την εγκατάστασή του είναι ιδιαίτερης σημασίας στην εξασφάλιση της υδατοστεγανότητας του αρμού. Ένας φαρδύς εύκαμπτος φραγμός συχνά καταστρέφεται ή μετακινείται κατά την έγχυση του σκυροδέματος, άρα ο φραγμός πρέπει να είναι στενός αλλά επαρκούς πλάτους που να εξασφαλίζει από την πιθανότητα εξόλκευσής του από την κατασκευή. Πρέπει επίσης να έχει αρκετό πάχος ώστε να είναι δύσκαμπτος και ανθεκτικός στις δύσκολες συνθήκες του εργοταξίου. Το σκυρόδεμα πρέπει να εγχέεται και να δονείται με ιδιαίτερη προσοχή γύρω από τον αρμό. Εφόσον ο φραγμός έχει σχεδιασθεί έτσι ώστε να τοποθετηθεί ορθά, και ο εγκιβωτισμός του στο σκυρόδεμα γίνει με σωστή έγχυση, τότε θα υπάρξει πολύ μικρή ανάγκη διορθωτικών εργασιών μετά την κατασκευή για το σφράγισμα σημείων διήθησης του νερού. Συχνά χρησιμοποιείται μπεντονίτης ως πρόσθετο μέτρο προστασίας στους αρμούς. Ο μπεντονίτης είναι ηφαιστειακή τέφρα που διογκώνεται όταν βρέχεται ώστε να γεμίζει τις ρωγμές μέσα από τις οποίες μπορεί να διηθείται το νερό. Αυτή η επιπλέον προστασία συνιστάται σε περιοχές όπου η υδατοστεγάνωση είναι ιδιαίτερης σημασίας. Εφόσον συμβαίνουν διαρροές και απαιτείται η λήψη μέτρων, η συνήθης μέθοδος έγκειται στην εισπίεση ενέματος (Σχήμα 11-19) είτε στο ελαττωματικό σκυρόδεμα είτε στο έδαφος από μέσα από τη σήραγγα στην περιοχή της διαρροής.

Βιβλιογραφία

NHI (2009). "Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels – Civil Elements – Chapter 5 Cut and Cover Tunnels", U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-NHI-10-034, December.

Peck RB, Hanson WE, Thornburn TH (1974). "Foundation Engineering", 2nd ed., J Wiley.

Powderham AJ (1990). "Cut and cover design and construction in reinforced concrete", in "Civil Engineering for underground rail transport", ed. Edwards JT, Butterworths.

Sauer G (1994). "Reprints" courtesy of Tunnels & Tunnelling.

Wilton JL. (1996). "Cut and Cover Tunnel Structures", in "Tunnel Engineering Handbook", Bickel JO & Kuesel TR, King EH., Chapman & Hall, ITP.

Xanthakos PP (1993). "Slurry walls as structural systems", Mcgraw-Hill

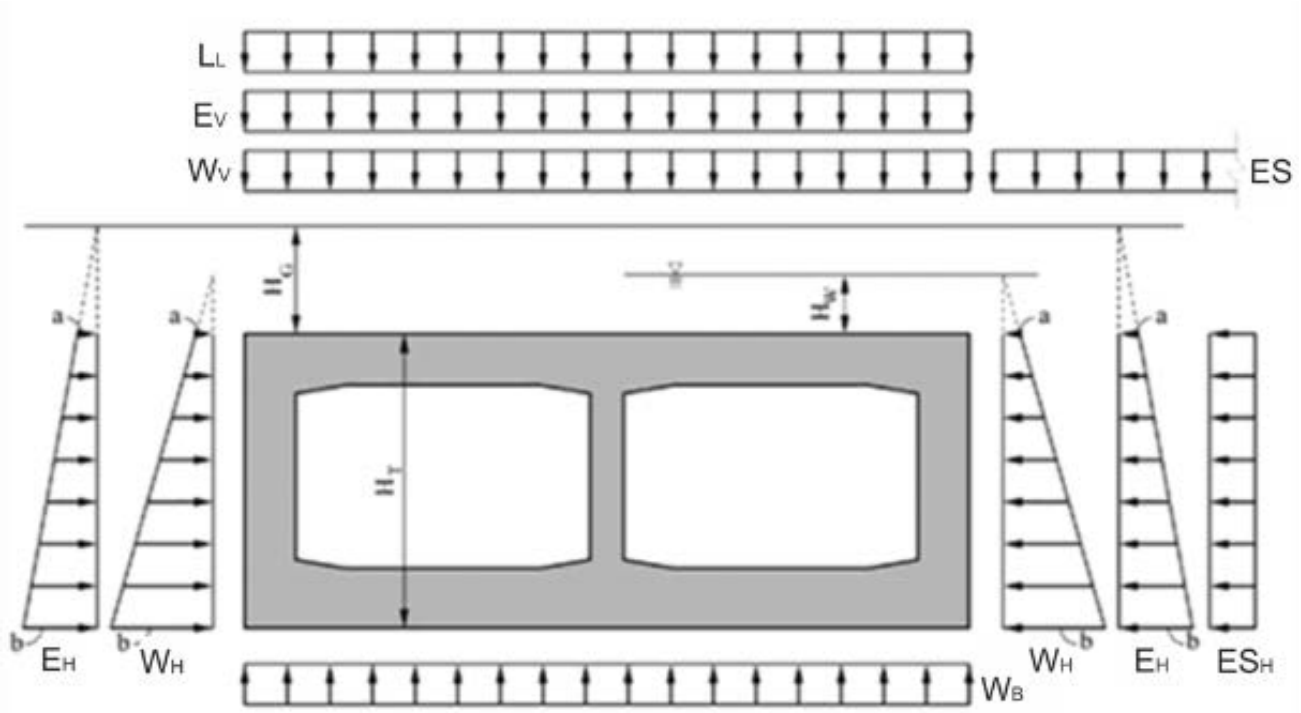
Sika (- α). "Waterproofing Sikaplan® Membrane systems for tunnels-Technology & Concepts", Sika Hellas ABEE.

Sika (- β). "Waterproofing Sika Solutions for Watertight Tunnel Structures", Sika Services AG.

Κριτήρια αξιολόγησης

Κριτήριο αξιολόγησης 1.

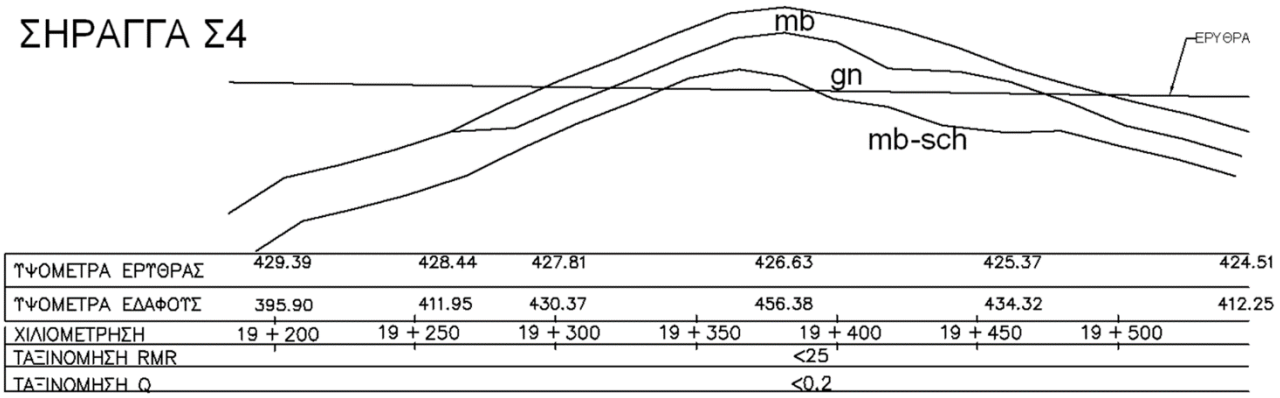
Για σήραγγα του μετρό της Αθήνας κατασκευάζεται με ανοικτό όρυγμα πλάτους 15m και βάθους 17m από κάτω προς τα πάνω. Ο υδροφόρος ορίζοντας είναι σε βάθος 3m από την επίγεια επιφάνεια, και ο συντελεστής πλευρικών ωθήσεων K_0=0.5. Εκτιμείστε τα δρώντα φορτία.



Σχήμα 11-20. Σήραγγα ανοικτής εκσκαφής του Μετρό της Αθήνας

Θέμα

Στο τμήμα της Εγνατίας Οδού από τη Χ.Θ. 19+250 έως τη Χ.Θ. 19+500 (Σχήμα 11-21), θα κατασκευασθεί η σήραγγα Σ4. Η εξεταζόμενη περιοχή αποτελεί πλαγιά ομαλού λόφου στις νότιες παρυφές του όρους Βέρμιο. Το έδαφος στην περιοχή αυτή παρουσιάζει έντονο ανάγλυφο και διασχίζεται από χείμαρρους με κατεύθυνση προς τον ταμιευτήρα του φράγματος.



Σχήμα 11-21. Μηκοτομή σήραγγας

Η περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται από πολύπλοκη γεωλογική δομή. Σε γενικές γραμμές αναφέρεται ότι γεωτεκτονικά ανήκει στην ενότητα της Πελαγονικής ζώνης που χαρακτηρίζεται από μεγάλη ποικιλία γεωλογικών σχηματισμών και διαταραγμένη τεκτονική εξέλιξη. Συγκεκριμένα οι σχηματισμοί που απαντώνται είναι οι ακόλουθοι:

α) Φυλλίτες και Ασβεστόλιθοι με ενστρώσεις Φυλλιτών

Πρόκειται για τους σχηματισμούς που έχουν τη μεγαλύτερη επιφανειακή εξάπλωση στο μελετώμενο τμήμα. Πρόκειται για ημιμεταμορφωμένο σχηματισμό που δίνει την εικόνα μεταμορφωμένου φλύσχη. Αποτελείται από φυλλοποιημένους ασβεστόλιθους, ασβεστιτικούς φυλλίτες, τεφρούς κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους, μαργαϊκούς και ψαμμιτικούς ασβεστολίθους, ασβεστιτικούς ψαμμίτες, γραουβάκες και σχιστολίθους σε εναλλαγές στρώσεων. Στη δομή του σχηματισμού παρατηρούνται να συμμετέχουν και μεταηφαιστίτες. Τοπικά παρατηρείται περιοδική επικράτηση κάποιου από τα παραπάνω που καθορίζει παράλληλα και την εν γένει συμπεριφορά του σχηματισμού. Το πάχος της στρώσης του σχηματισμού κυμαίνεται εντός ευρέων ορίων. Έτσι έχουμε περιοχές που επικρατούν μεσο - λεπτοστρωματώδεις ασβεστόλιθοι και άλλες (κυρίως στην περιοχή της Λευκόπετρας) όπου επικρατούν οι φυλλίτες με πάχος στρώσης έως 20mm. Εξαιτίας του έντονου τεκτονισμού, το συνολικό πάχος του σχηματισμού δεν είναι γνωστό.

Από πλευράς ευστάθειας προβλέπεται να παρουσιαστούν προβλήματα στα τμήματα της χάραξης που παρατηρείται επικράτηση των φυλλιτών. Στα τμήματα αυτά εξαιτίας του κατακερματισμού και των λεπτών στρώσεων, ο σχηματισμός εμφανίζεται πολύ χαλαρός. Όσον αφορά στους ασβεστολίθους με φυλλιτικές ενστρώσεις, αυτοί παρότι δεν αποτελούν ενιαίο σχηματισμό με τους φυλλίτες, εξετάζονται από κοινού λόγω της παρόμοιας γεωτεχνικής συμπεριφοράς τους.

β) Μάρμαρα

Πρόκειται για λευκά φυλλοποιημένα μάρμαρα που απαντώνται στη στενή περιοχή της Λευκόπετρας. Ο σχηματισμός αυτός κατά μήκος της χάραξης παρουσιάζεται έντονα κατακερματισμένος και αποσαθρωμένος, υπέρκειται δε γνευσίων και σχιστολίθων. Η μικρή του εξάπλωση του προσδίδει δευτερεύοντα ρόλο όσον αφορά στη χάραξη του έργου. Η επαφή του με τον υπερκείμενο σχηματισμό των φυλλιτών είναι τεκτονική και συντελείται μέσω μιας ρηξιγενούς ζώνης που διαπιστώθηκε και από τις γεωτρήσεις που έγιναν στην περιοχή μεταξύ. Από υδρογεωλογικής πλευράς αποτελεί το σημαντικότερο υδροφορέα της περιοχής (πηγές Λευκόπετρας).

γ) Τεκτονικοϊζηματογενείς σχηματισμοί - Κλαστικοί σχηματισμοί

Πρόκειται για μυλονίτες, τεκτονικά λατυποπαγή, κροκαλοπαγή και υλικά πλήρωσης ρηγμάτων που έχουν υποστεί διαγένεση. Τα τελευταία οριοθετούν την επαφή των φυλλιτών με τα μάρμαρα. Κατά μήκος της χάραξης εμφανίζονται αποσαθρωμένα και χαλαρά, έχοντας τη συμπεριφορά συνεκτικών κορημάτων παρουσιάζουν δε μικρή υδροφορία. Τα τεκτονικά λατυποπαγή και κροκαλοπαγή περιέχουν κυρίως θραύσματα ασβεστόλιθων, ψαμμιτών, σχιστολίθων, οφιολίθων και γνευσίων ισχυρά συγκολλημένων μέσα στην ανθρακική μάζα. Παρατηρούνται επίσης ζώνες έντονου κερματισμού και αποσάθρωσης και μάλιστα σε τμήματα μεγάλης σπουδαιότητας όσον αφορά στη χάραξη του έργου.

Στο βάθος που διερευνήθηκε, μέχρι τα 35m, απαντήθηκαν οι ακόλουθοι σχηματισμοί:

1. Επιφανειακά και μέχρι βάθους 9m απαντάται κερματισμένο και αποσαθρωμένο μάρμαρο λευκού χρώματος, υπό μορφή ιλυωδών χαλίκων.
2. Στη συνέχεια και μέχρι βάθους 16.50m απαντάται πολύ αποσαθρωμένος σχιστόλιθος υπό μορφή αργιλώδους άμμου έως αμμώδους αργίλου χαμηλής πλαστικότητας με χαλίκια.
3. Τέλος, μέχρι βάθους 35m απαντώνται εναλλαγές αποσαθρωμένων και κατακερματισμένων σχιστολίθων και μαρμάρων.

Από πλευράς τεκτονικής η περιοχή μελέτης φαίνεται ότι έχει υποστεί έντονη καταπόνηση σε διάφορες φάσεις της γεωλογικής της εξέλιξης. Οι κύριες διευθύνσεις των ρηγμάτων είναι ΒΔ-ΝΑ και σχετίζονται με τις μεγάλες τεκτονικές γραμμές (Ζώνη Αξιού) καθώς και ΔΝΔ-ΑΒΑ που έχουν σχέση με το βύθισμα του Αλιάκμονα. Παράλληλα με την πρώτη διεύθυνση βαίνει και η επώθηση των φυλλιτών πάνω στα μάρμαρα στην περιοχή της Λευκόπετρας. Τα τεκτονικά αυτά γεγονότα, εκτός της συμβολής τους στη διαμόρφωση του ανάγλυφου, έχουν κατακερματίσει τους βραχώδεις σχηματισμούς, παράλληλα δε έχουν διαφοροποιήσει τις μηχανικές τους ιδιότητες. Επιπλέον έχουν δημιουργηθεί ασταθείς ζώνες κατολισθήσεων που έχουν παρατηρηθεί κυρίως στην περιοχή της Λευκόπετρας.

Από τις μετρήσεις στάθμης που έγιναν στις γεωτρήσεις που εκτελέστηκαν δεν παρατηρήθηκε αξιόλογη υδροφορία σε όλο το μήκος της χάραξης. Άλλωστε οι απότομες κλίσεις του ανάγλυφου σε συνδυασμό με τη φύση των πετρωμάτων ευνοούν περισσότερο την επιφανειακή απορροή παρά την κατείσδυση. Ο έντονος κατακερματισμός των σχηματισμών βοηθά επίσης τη διήθηση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων σε βαθύτερους από τα τελικά βάθη των γεωτρήσεων ορίζοντες και την αποστράγγισή τους στον Αλιάκμονα, που πιθανόν αποτελεί το επίπεδο αναφοράς.

Στην κλίμακα κατασκευής του συγκεκριμένου τεχνικού και στην άμεση ζώνη επιρροής του, σύμφωνα με τα στοιχεία της γεωλογικής μελέτης και της συνολικής αξιολόγησης της γεωτρητικής διασκόπησης που διενεργήθηκε, διαπιστώνονται τα ακόλουθα :

- *Οι γεωλογικοί σχηματισμοί παρουσιάζονται έντονα αποσαθρωμένοι και αργιλοποιημένοι, σε βάθος που υπερβαίνει τα 15m. Από τεχνικογεωλογική άποψη συμπεριφέρεται ως έδαφος. Δεν είναι δυνατή η διατήρηση, ούτε και προσωρινά, πρανών με μεγάλη κλίση για τις ανάγκες της κατασκευής.*
- *Σε βάθος μεγαλύτερο των 15m ο γνευσιακός σχηματισμός εμφανίζεται υγιέστερος.*

ΖΗΤΟΥΜΕΝΑ

1. Η θέση έναρξης και πέρατος της σήραγγας για υπερκείμενο 5m κατακόρυφο άνοιγμα πάνω από την ερυθρά 9m.
2. Καθορίστε στην οριζοντιογραφία τα τμήματα όπου θα πρέπει να εφαρμοστεί η μέθοδος ανοικτής εκσκαφής και επανεπίχωσης.
3. Σχεδιάστε σε εγκάρσια τομή τα τμήματα cut & cover στη Χ.Θ. έναρξης του cut & cover λαμβάνοντας υπόψη ότι ως ασφαλής κλίση πρανούς επιλέχθηκε η 1:2.
4. Το είδος του μηχανολογικού εξοπλισμού για τα τμήματα cut & cover.

Κεφάλαιο 12

Σύνοψη
Οι επιπυθμένιες σήραγγες κατασκευάζονται στην ξηρά, και ποντίζονται στη θέση τους στο βυθό της θάλασσας, λίμνης ή ποταμού. Περιγράφονται η διαμόρφωση των λεκανών και οι τρόποι προκατασκευής των φορέων τους, καθώς και οι μέθοδοι ρυμούλκησης και τοποθέτησής τους. Εμπέδωση επιτυγχάνεται με παραδείγματα και ασκήσεις.

Προαπαιτούμενη γνώση
Μαθήματα: Οπλισμένο σκυρόδεμα –Μεταλλικές κατασκευές, Εδαφομηχανική και στοιχεία θεμελιώσεων. Χρήσιμη βιβλιογραφία: Gursoy (2004), Lunniss & Baber (2013).

12. Ποντιζόμενες σήραγγες

12.1 Εισαγωγή

Οι επιπυθμένιες σήραγγες προκατασκευάζονται στην ξηρά, μετά ρυμουλκούνται και βυθίζονται (ποντίζονται) στη θέση λειτουργίας τους, εντός εκσκαμμένης υφαλαύλακας, και στο τέλος επιχώνονται. Ως εκ τούτου ονομάζονται και βυθισμένες ή ποντισμένες (immersed or submerged) σήραγγες. Ο τρόπος κατασκευής τους είναι ιδανικός για σήραγγες κάτω από διαύλους ναυσιπλοΐας, καθόσον η μεταφορά και τοποθέτηση βασίζεται στο νερό. Η πρώτη εφαρμογή βυθισμένης σήραγγας στις ΗΠΑ ήταν το 1896 για την κατασκευή υδραυλικής σήραγγας (Gursoy, 2004). Η πρώτη βυθισμένη σιδηροδρομική σήραγγα (Σχήμα 12-1), μήκους 800 m, κατασκευάστηκε το 1910 κάτω από τον ποταμό Detroit.

Η πρώτη βυθισμένη οδική σήραγγα κατασκευάστηκε το 1928 από σκυρόδεμα για να συνδέσει το Oakland με το Alameda. Σήμερα υπάρχουν στον κόσμο λιγότερες από 300 επιπυθμένιες σήραγγες, που είναι μικρός αριθμός σε σύγκριση με άλλες διαδικασίες κατασκευής σηράγγων. Οι μέθοδοι κατασκευής συνδυάζουν τεχνογνωσία από πολλές άλλες καθιερωμένες πρακτικές. Με ελάχιστες τέτοιες σήραγγες να ανοίγουν κάθε έτος, η γνώση της τεχνικής περιορίζεται σε μια μικρή κοινότητα μελετητών και κατασκευαστών. Κατασκευάζονται ως επί το πλείστον σε ορισμένες γεωγραφικές περιοχές ως αποτέλεσμα των απαιτήσεων της γεωλογίας και των υποδομών μεταφοράς των διαφόρων χωρών. Οι κύριες περιοχές κατασκευής τους είναι οι Ηνωμένες Πολιτείες, Ευρώπη, Ιαπωνία και Κίνα, με πολλές άλλες χώρες να έχουν μία ή δυο τέτοιες σήραγγες. Οι περισσότερες επιπυθμένιες σήραγγες είναι οδικές ή σιδηροδρομικές, αλλά έχουν επίσης κατασκευαστεί ως σήραγγες ΟΚΑ που μεταφέρουν νερό, λύματα και ισχύ, καθώς και εισροής και εκροής νερού ψύξης σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Εξαιτίας του εύρους των σκοπών τους, οι διαστάσεις τους ποικίλλουν σε μεγάλο βαθμό. Μία τυπική επιπυθμένια οδική σήραγγα διπλής κατεύθυνσης έχει περίπου 30 m πλάτος, 9 m ύψος, και περίπου 2 km μήκος. Βασικές αρχές κατασκευής τους είναι:

- Αποτελούνται από μία σειρά προκατασκευασμένων σπονδύλων, εκάστου τυπικά ~150 m μήκος
- Οι σπόνδυλοι είναι μελετημένοι να επιπλέουν, ώστε να μπορούν να ρυμουλκηθούν στη θέση της σήραγγας
- Οι σπόνδυλοι βυθίζονται εντός μιας τάφρου που έχει εκβαθυνθεί στον πυθμένα του πορθμού ναυσιπλοΐας και ενώνονται μεταξύ τους
- Η τάφρος επιχωματώνεται και τα τελειώματα της σήραγγας ολοκληρώνονται εσωτερικά.



Σχήμα 12-1. Βύθιση σπόνδυλου βυθισμένης σήραγγας κάτω από τον ποταμό Detroit ~1910, της εταιρείας σιδηροδρόμων του Michigan (http://www.shorpy.com/node/8647)

12.2 Φορείς επιπυθμένιων σηράγγων

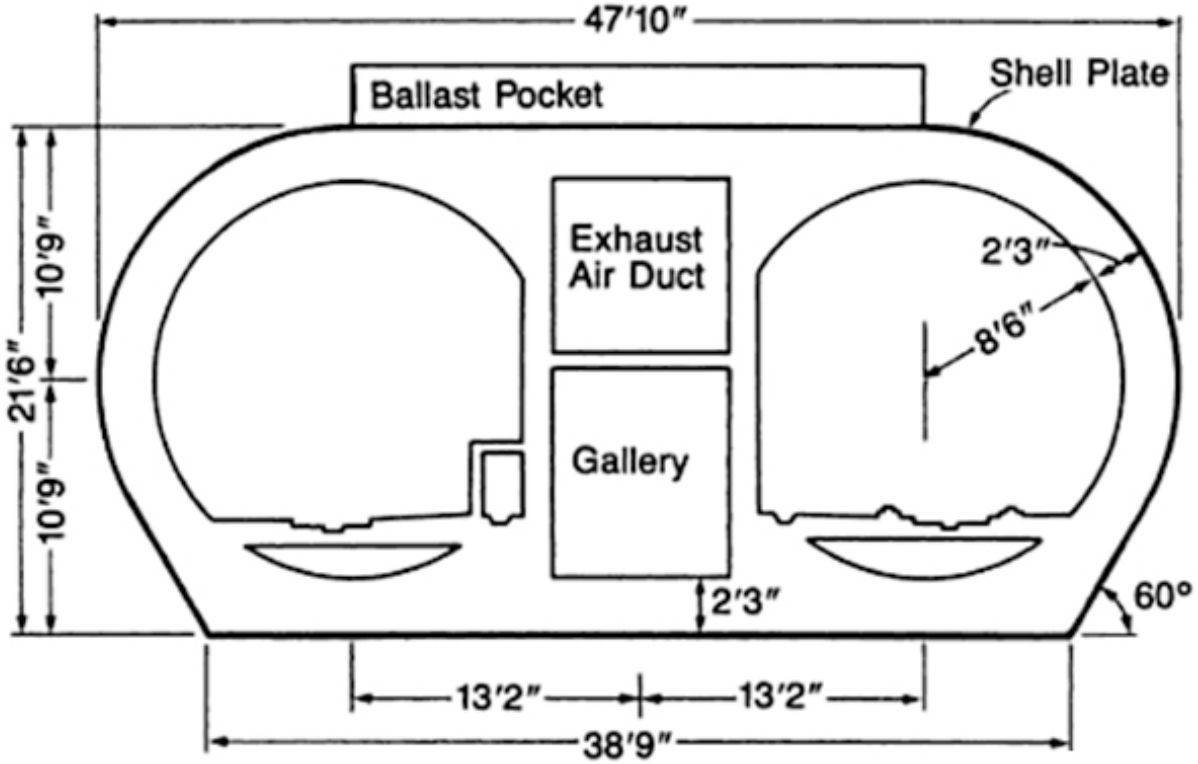
Οι δύο κύριοι τύποι των επιπυθμένιων σηράγγων είναι είτε από χάλυβα και σκυρόδεμα είτε από οπλισμένο σκυρόδεμα. Καθένας από αυτούς έχει περίπου ίσες ποσότητες από σκυρόδεμα, αλλά οι μέθοδοι κατασκευής τους διαφέρουν. Σήραγγες από χάλυβα χρησιμοποιούν δομικό χάλυβα, συνήθως με τη μορφή πλακών με νευρώσεις, που συνεργάζονται με το εσωτερικό σκυρόδεμα, ενώ οι σήραγγες από σκυρόδεμα ενισχύονται από χαλύβδινες ράβδους οπλισμού ή καλώδια προέντασης. Οι σήραγγες από οπλισμένο σκυρόδεμα περιλαμβάνουν σπονδύλους μονολιθικής ή τμηματικής μορφής, ενώ οι σήραγγες από χάλυβα και σκυρόδεμα κατασκευάζονται από σπονδύλους που αποτελούνται από μονό χαλύβδινο κέλυφος, διπλό χαλύβδινο κέλυφος, ή σύμμικτη κατασκευή. Υπάρχουν παραλλαγές του κάθε τύπου, αλλά και οι δύο παρέχουν ανθεκτικά μακράς διαρκείας δομήματα που μπορούν να κατασκευαστούν με ασφάλεια. Κάθε μία έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά. Οι σήραγγες από χάλυβα κατασκευάζονται πιο εύκολα και χρειάζονται μικρότερες εγκαταστάσεις, αλλά οι σήραγγες από σκυρόδεμα κατασκευάζονται από φθηνότερο υλικό. Ο τύπος της επιπυθμένιας σήραγγας που επιλέγεται υπαγορεύεται από έναν αριθμό παραγόντων που περιλαμβάνουν τοπικές συνήθειες, εξοικείωση του μελετητή, διαθεσιμότητα εγκαταστάσεων κατασκευής, εμπειρία του ανάδοχου, καταλληλότητα τελικού προϊόντος, ασφάλεια και κόστος. Η τελική επιλογή βασίζεται στα συγκριτικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του κάθε τύπου.

12.2.1 Κελύφη από χάλυβα και σκυρόδεμα

Οι σήραγγες από χάλυβα έχουν διατομή είτε κυκλική είτε καμπύλη με επίπεδο πυθμένα, ή ορθογωνική ειδικά στην Ιαπωνία. Η κυρίαρχη διατομή στις ΗΠΑ είναι σωλήνα δίδυμη (Σχήμα 12-2, Σχήμα 12-3β) ή απλή, αποτελούμενη κάθε μία από ένα εσωτερικό κυκλικό κέλυφος μέσα σε ένα οκταγωνικό κέλυφος (Gursoy, 1995), με αγωγούς εξαερισμού πάνω και κάτω από το οδόστρωμα. Η διάταξη αυτή των αγωγών εξαερισμού μπορεί να αλλάξει, επειδή οι σημερινές τεχνικές επιτρέπουν τη χρήση διαμήκους αερισμού σε πολύ μεγαλύτερες σήραγγες, παρακάμπτοντας την ανάγκη για ξεχωριστούς αγωγούς. Τα κελύφη από χάλυβα αναπτύχθηκαν αρχικά στις Ηνωμένες Πολιτείες και κυριαρχούν σε ποσοστό 90% εκεί, αλλά κατασκευάζονται σε ολόκληρο τον κόσμο. Οι σπόνδυλοι των χαλύβδινων σηράγγων είναι μονολιθικοί. Αρθρώσεις υφίστανται μόνον στους αρμούς μεταξύ των σπονδύλων, μολονότι συχνά οι αρμοί συγκολλούνται προκειμένου να εξασφαλίζεται η συνεχής δομή της σήραγγας (Lunniss & Baber, 2013). Το σκυρόδεμα στις σήραγγες αυτές εγχέεται εν πλω. Τα ύφαλα των σπονδύλων πριν από την τοποθέτηση του σκυροδέματος, είναι ως 2.5 m βάθος, αλλά μετά την σκυροδέτηση οι σπόνδυλοι δεν έχουν σχεδόν καθόλου έξαλα. Η σειρά με την οποία σκυρόδεμα εγχέεται εν πλω πρέπει να ελέγχεται αυστηρά για την ελαχιστοποίηση των παραμορφώσεων και των ροπών, λαμβάνοντας υπόψη ότι οι κατασκευαστικοί αρμοί στο σκυρόδεμα είναι περιοχές ευάλωτες σε διαρροή. Η εγκατάσταση κατασκευής τους μπορεί να είναι υπέργεια ειδική για το έργο ή ένα υπάρχον ναυπηγείο. Λόγω της μικρού βάρους του σπονδύλου από χάλυβα μπορούν εύκολα καθελκυσθούν και να μεταφερθούν εν πλω σε μεγάλες αποστάσεις. Οι σπόνδυλοι (Grantz, 1997) είναι μονού, διπλού ή σύμμικτου κελύφους (Ingerslev, 2006).

Ο σπόνδυλος μονού χαλύβδινου κελύφους έχει εξωτερικά το κέλυφος από πλάκα χάλυβα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η σήραγγα BART που φαίνεται στο Σχήμα 12-2. Το χαλύβδινο κέλυφος παρέχει αντοχή και στεγανότητα. Μέσα από αυτό τοποθετείται μία επένδυση από οπλισμένο σκυρόδεμα που μελετάται συνήθως ώστε να λειτουργεί από κοινού. Καθώς το χαλύβδινο κέλυφος παρέχει το υδατοστεγές φράγμα, πρέπει να προστατεύεται κατά της διάβρωσης, συνήθως με σύστημα καθοδικής προστασίας. Η σιδηροκατασκευή για το κέλυφος μπορεί να κατασκευαστεί σε μια συγκριτικά μικρή εγκατάσταση ή σε ένα υπάρχον ναυπηγείο. Τούτο μπορεί να είναι επιπλέον πλεονέκτημα εάν υπάρχουν ισχυρές περιβαλλοντικές αντιρρήσεις για τη διαμόρφωση ενός μεγάλου εργοταξίου προκατασκευής των σπονδύλων. Το ορθογωνικό χαλύβδινο κέλυφος του σπονδύλου της σήραγγας δύναται να κατασκευαστεί στην ξηρά και στη συνέχεια να εγχυθεί το σκυρόδεμα στο εσωτερικό του ενώ επιπλέει. Για να είναι το χαλύβδινο κέλυφος αρκετά ισχυρό ώστε να πλέει, θα πρέπει να ενισχύεται με διαμήκεις και εγκάρσιες αντηρίδες, χρησιμοποιώντας ναυπηγικές πρακτικές. Βλήτρα διάτμησης τοποθετούνται στην εσωτερική όψη του χαλύβδινου κελύφους προκειμένου να κινητοποιείται η σύνθετη δράση χάλυβα και σκυροδέματος.

Η εγκάρσια τομή ενός διπλού χαλύβδινου κελύφους έχει ένα φέρον (δομητικό) εσωτερικό κυκλικό χαλύβδινο κέλυφος που λειτουργεί σύμμεικτα με κέλυφος από οπλισμένο σκυρόδεμα εντός αυτού και προστατεύεται από εξωτερικό σκυρόδεμα, που λειτουργεί και ως έρμα, και τοποθετείται εντός μη φέροντος χαλύβδινου μεταλλότυπου. Το εσωτερικό χαλύβδινο κέλυφος παρέχει αντοχή και στεγανότητα, και κατασκευάζεται και ενισχύεται κατά τρόπο παρόμοιο με το μονό χαλύβδινο κέλυφος. Το εσωτερικό κέλυφος και ο μεταλλότυπος συνδέονται με μια σειρά από εγκάρσιες διαφραγματικές πλάκες που διαμερισματοποιούν το κενό μεταξύ των κελυφών και προσθέτουν δυσκαμψία στη δομή. Το έρμα από σκυρόδεμα προστατεύει το εσωτερικό χαλύβδινο κέλυφος από τη διάβρωση. Η μέθοδος κατασκευής είναι παρόμοια με εκείνη του μονού χαλύβδινου κελύφους. Το χαλύβδινο κέλυφος κατασκευάζεται σε μια σειρά από ενότητες, που στη συνέχεια συναρμολογούνται σε νεωλκείο, και καθελκύονται. Στη συνέχεια ρυμουλκείται σε κατάλληλη θέση όπου, ενώ ο σπόνδυλος επιπλέει, εγχέεται το σκυρόδεμα. Σήραγγες διπλού κελύφους βρίσκονται μόνο στις ΗΠΑ, και παραδείγματα τους είναι οι Fort McHenry (Baltimore), και η Ted Williams (Boston).



Σχήμα 12-2. Επιπυθμένια σήραγγα μονού κελύφους του BART· κατασκευάστηκε το 1970. (Munfah & Tarhan, 1990)



(α) Οι σπόνδυλοι της σήραγγας Fort McHenry (Baltimore). Φωτογραφία από τον Walter Hipkins (http://www.cecildaily.com/gallery/news/collection_e1a9c55e-f77c-11df-a543-001cc4c002e0.html)



(β) Οι σπόνδυλοι της σήραγγας Ted Williams (Boston) φτάνουν στο λιμάνι (Ingerslev, 2006)

Σχήμα 12-3. Σπόνδυλοι επιπυθμένιων σηράγγων διπλού χαλύβδινου κελύφους

Πρόσφατη εξέλιξη στην Ιαπωνία είναι οι σύμμεικτες σήραγγες από άοπλο σκυρόδεμα μεταξύ δύο φερόντων (δομητικών) κελυφών χάλυβα (Kimura et al., 2002). Για την επίτευξη του σύμμικτης λειτουργίας, στις εσωτερικές επιφάνειες των δύο χαλύβδινων πλακών τοποθετούνται διατμητικά βλήτρα και εσωτερικά χαλύβδινα διαφράγματα που συνδέουν τις εσωτερικές και εξωτερικές χαλύβδινες πλάκες. Αυτό δημιουργεί ένα πολύ ισχυρό και όλκιμο κέλυφος που σε οριακή κατάσταση μπορεί να αναλάβει σεισμικά φορτία και μεγάλες παραμορφώσεις χωρίς θραύση. Το σύμμεικτο κέλυφος έχει μεγάλη αντοχή (Narayanan et al., 1997), έτσι ώστε το πάχος που απαιτείται για να αντισταθεί στις δομητικές φορτίσεις να μπορεί να μειωθεί. Η απόσταση των διατμητικών βλήτρων που συνδέουν τη χαλύβδινη πλάκα με το σκυρόδεμα πρέπει να περιορίζεται έτσι ώστε η πλάκα να μην λυγίζει μεταξύ των διατμητικών βλήτρων. Λόγω του μικρότερου πάχους της διατομής του κελύφους, αυτό είναι ελαφρύτερο και ως εκ τούτου μπορεί να ρυμουλκηθεί στη θέση της σήραγγας ευκολότερα. Ωστόσο, το πλεονέκτημα αυτό αναιρείται, επειδή το βάρος του σκυροδέματος εξυπηρετεί επίσης ως έρμα. Αν

το απαιτούμενο βάρος δεν βρίσκεται μέσα στο δομικό στοιχείο, τότε πρέπει να εφαρμοστεί ως έρμα είτε στο εσωτερικό της σήραγγας είτε επάνω στην οροφή της. Δυσκολίες σημαντικές αφορούν στη σκυροδέτηση, ειδικά της οροφής και του δαπέδου, που όμως έχουν ξεπεραστεί με τη χρήση μη συρρικνούμενου αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος, καθόσον τεχνικές εσωτερικής δόνησης δεν είναι δυνατές. Η απαίτηση ύπαρξης πολλών οπών και εξωτερικών κιβωτίων στα τοιχώματα για Η/Μ πίνακες και εξόδους κινδύνου, αυξάνουν σημαντικά τη δυσκολία κατασκευής του εσωτερικού χαλύβδινου κελύφους και της σκυροδέτησης. Η πυρκαγιά αποτελεί κίνδυνο στις σύμμεικτες σήραγγες, λόγω της σημασίας της εσωτερικής χαλύβδινης πλάκας στην αντοχή του κελύφους (Lunniss & Baber, 2013), και γι' αυτό εφαρμόζεται στρώμα πυροπροστασίας του εσωτερικού χαλύβδινου κελύφους. Παραδείγματα τέτοιων σηράγγων, που φαίνονται στο Σχήμα 12-4, είναι λίγα και μόνο από την Ιαπωνία.



Σπόνδυλος (81×28×8.4) οδικής σήραγγας Shinwakato κατά την κατασκευή. Περατώθηκε το 2007.

Σπόνδυλος (90×37×8.7) της οδικής σήραγγας του αεροδρομίου του Naha κατά την κατασκευή. Περατώθηκε το 2003.

Σχήμα 12-4. Επιπυθμένιες σύμμεικτες σήραγγες (http://www.jfe-eng.co.jp/en/products/infrastructure/coast/co10.html) courtesy of JFE ENGINEERING Corporation (2014)

12.2.2 Φορέας από σκυρόδεμα

Η κυρίαρχη διατομή για σήραγγες από σκυρόδεμα είναι η ορθογωνική. η οποία είναι ιδιαίτερα ελκυστική για πλατείς αυτοκινητόδρομους και οδικές / σιδηροδρομικές σήραγγες (Rasmussen, 1997). Σε συνθήκες υψηλών εξωτερικών υδροστατικών πιέσεων, οι εγκάρσιες ροπές και διατμητικές δυνάμεις μειώνονται με τη διαμόρφωση μιας πιο καμπύλης εξωτερικής διατομής. Επειδή οι σήραγγες από σκυρόδεμα είναι βαριές εξ αρχής, κατασκευάζονται σε ξηρές νεωδόχους (λεκάνες χύτευσης), με δυνατότητα να πλημμυριστούν όταν έρθει η ώρα για τη μεταφορά των σπονδύλων.

Η πιο απλή από τις επιλογές σήραγγας από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι ο μονολιθικός σπόνδυλος ο οποίος είναι ένα συνεχές στοιχείο που λειτουργεί ως δοκός (Lunniss & Baber, 2013). Ο σπόνδυλος κατασκευάζεται ως ένα συνεχές κιβώτιο, με πάτωμα, εξωτερικούς τοίχους και οροφή πάχους περίπου 1 m, και εσωτερικά τοιχώματα πάχους μεταξύ 300 και 700 mm. Η βάση, τα τοιχώματα και η οροφή είναι όλα άκαμπτα συνδεδεμένα με τον οπλισμό να είναι συνεχής σε όλη τη διατομή και κατά μήκος των κατασκευαστικών αρμών. Αρθρωτή δομή της σήραγγας παρέχεται από τους αρμούς σύνδεσης των σπονδύλων. Στον μονολιθικό σπόνδυλο, ο κύριος κίνδυνος είναι η διαρροή μέσα από τις ρωγμές συρρίκνωσης στο σκυρόδεμα. Αυτές οι ρωγμές διαπερνούν όλο το πάχος του σκυροδέματος και δημιουργούν δίοδο του νερού από το εξωτερικό προς το εσωτερικό της σήραγγας. Προκαλούνται, για παράδειγμα, όταν το πρόσφατα χυμένο σκυρόδεμα του τοίχου ψύχεται και συστέλλεται, αλλά περιορίζεται από το σκληρυμένο σκυρόδεμα της βάσης επί της οποίας εδράζεται. Λαμβάνονται μέτρα για την ελαχιστοποίηση της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του νωπού σκυροδέματος και του προηγουμένως τοποθετημένου σκληρυμένου σκυροδέματος. Αυτά τα μέτρα ωστόσο, δεν εγγυώνται απόλυτη επιτυχία και γι' αυτό παρέχεται μία εξωτερική μεμβράνη που εξασφαλίζει τη

στεγανότητα του σπονδύλου, που όμως μπορεί να απαιτεί προστασία. Ιδανικά, μία τέτοια μεμβράνη πρέπει να προσκολλάται στο σκυρόδεμα ώστε να περιορίζει την εξάπλωση της διαρροής σε αυτήν.

Η σήραγγα Πρέβεζα Άκτιο είναι η μόνη επιπυθμένια στην Ελλάδα. Κατασκευάσθηκε από την κοινοπραξία Christiani & Nielsen Ltd. και ΤΕΓΚ από τα μέσα της δεκαετίας του 1990 μέχρι το 2002 (http://www.mypreveza.gr/2013/04/blog-post_9.html). Στο Σχήμα 12-5 φαίνεται η νεωδόχος στην οποία χυτεύονται οι σπόνδυλοι. Το έργο αποτελείται από 152 m σήραγγας κοπής & επανεπίχωσης από την πλευρά του Ακτίου, 909 m βυθισμένης σήραγγας κάτω από το στενό σε μέγιστο βάθος 27 m κάτω από τη θάλασσα και 509 m σήραγγας κοπής & επανεπίχωσης από την πλευρά της Πρέβεζας. Η βυθισμένη σήραγγα έχει σχεδιαστεί για δύο λωρίδες κυκλοφορίας εντός ορθογωνικής διατομής, εσωτερικού πλάτους 10.6 m. Οι εξωτερικές διαστάσεις της βυθισμένης σήραγγας είναι 12.6 m πλάτος και 8.75 m ύψος. Οι οκτώ προκατασκευασμένοι σπόνδυλοι της σήραγγας, μήκους 59.2 m έως 134.5 m έκαστος, κατασκευάστηκαν σε λεκάνη χύτευσης που συνδέεται με το στενό από ένα κανάλι μήκους περίπου 150 m. Από τη λεκάνη χύτευσης οι σπόνδυλοι ρυμουλκήθηκαν προς την τελική τους θέση. Οι σπόνδυλοι τοποθετήθηκαν σε μια σκαμμένη τάφρο. Πριν από την βυθοκόρηση της τάφρου, είχαν τοποθετηθεί χαλικοπάσσαλοι διαμέτρου 0.6 m, για την αποτροπή της ρευστοποίησης σε περίπτωση ισχυρού σεισμού. Εύκαμπτοι αρμοί παρέχονται μεταξύ των σπονδύλων της σήραγγας. Η στεγανότητα των αρμών εξασφαλίζεται από ελαστικά παρεμβύσματα. Περαιτέρω, οι σπόνδυλοι της σήραγγας είναι εγκλεισμένοι μέσα σε μια υδατοστεγή μεμβράνη προκειμένου να αποφεύγεται πιθανή διαρροή. Οι σήραγγα έχει σχεδιαστεί για να αντέχει ισχυρές σεισμικές φορτίσεις. Σε σύγκριση με τις συνήθεις βυθισμένες σήραγγες, τα κλειδιά διάτμησης στους αρμούς μεταξύ των σπονδύλων της σήραγγας είναι ενισχυμένα. Επιπλέον, καλώδια προέντασης είναι τοποθετημένα εγκάρσια στους αρμούς έτσι ώστε να περιορίζονται οι διαφορικές μετακινήσεις κατά τη διάρκεια σεισμικών γεγονότων.

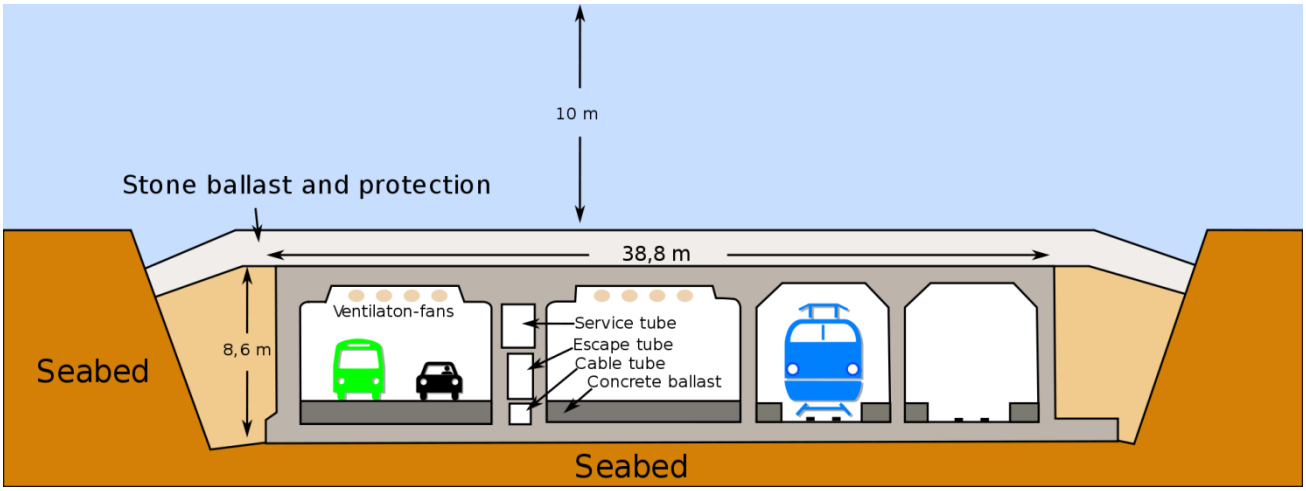


Σχήμα 12-5. Σπόνδυλοι της σήραγγας στη λεκάνη (νεωδόχο) χύτευσης στο Άκτιο (COWI, Tunnel Engineering)

Εξέλιξη του μονολιθικού σπονδύλου είναι ο τμηματικής μορφής σπόνδυλος από σκυρόδεμα, ώστε να αποφεύγεται η ρωγμάτωση και η εξ αυτής ανάγκη τοποθέτησης μιας εξωτερικής μεμβράνης στεγανοποίησης. Στην Ολλανδία βρέθηκε ότι εάν το μήκος του τμήματος σκυροδέματος της σήραγγα περιορίζονταν στα 22÷25 m, θα μπορούσε να χυτευθεί χωρίς να αναπτυχθούν ρωγμές συρρίκνωσης (Glerum, 1995). Το τμήμα του

σπονδύλου δεν κατασκευάζεται με μία έγχυση, αλλά η βάση εγχέεται πρώτη και οι τοίχοι και η οροφή προστίθενται σε μία επόμενη έγχυση σκυροδέματος. Αυτή η δεύτερη έγχυση ελέγχεται προσεκτικά έτσι ώστε η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ αυτής και της βάσης να μην είναι αρκετή για να προκαλέσει ρωγμάτωση του σκυροδέματος, καθώς ψύχεται. Οι τάσεις που αναπτύσσονται στο σκυρόδεμα όταν ψύχεται κρατούνται κάτω από την αναπτυσσόμενη αντοχή σε εφελκυσμό του σκυροδέματος. Αυτό επιτυγχάνεται με ένα συνδυασμό (α) της σύνθεσης μίξης του σκυροδέματος χρησιμοποιώντας ιπτάμενη τέφρα ή σκωρία υψικαμίνου για την αντικατάσταση στο μίγμα του συνήθους τσιμέντου Portland, ώστε να μειώνεται η θερμότητα ενυδάτωσης μέσα στο σκυρόδεμα και συνεπώς η θερμοκρασία που αναπτύσσεται κατά τη σκλήρυνση του σκυροδέματος, (β) ελέγχου της θερμοκρασίας ωρίμανσης του σκυροδέματος με σωλήνες νερού ενσωματωμένες στο σκυρόδεμα των τοιχίων και της οροφής ώστε να μειώνεται η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του νωπού και του σκληρυμένου σκυροδέματος, και (γ) τη μόνωση του μεταλλοτύπου ώστε να αποτρέπεται η πολύ γρήγορη ψύξη του σκυροδέματος.

Μέσα από την εφαρμογή αυτών των τεχνικών κατασκευής, καθίσταται δυνατή να κατασκευή τμημάτων για επιπυθμένιες σήραγγες χωρίς ρωγμές. Ωστόσο, στοιχεία μήκους 25 m δεν είναι πρακτικά για βυθισμένες σήραγγες, και γι' αυτό κατασκευάζονται σπόνδυλοι αποτελούμενοι από τμήματα. Για παράδειγμα (Øresund, 2000), οι σπόνδυλοι της βυθισμένης σήραγγας του Øresund (Σχήμα 12-6) έχουν μήκος 175 m κι αποτελούνται από οκτώ τμήματα μήκους 22 m έκαστο (Janssen & Lykke, 1997). Τα τμήματα προστίθενται το ένα δίπλα στο άλλο με τους αρμούς μεταξύ των τμημάτων να είναι ασυνεχείς και αποκολλημένοι. Τα τμήματα στη συνέχεια συσφίγγονται μεταξύ τους με διαμήκη προένταση, έτσι ώστε κατά τη μεταφορά και την τοποθέτηση να συμπεριφέρονται ως ένα ενιαίο ομοιογενές στοιχείο σήραγγας. Τα καλώδια προέντασης θεωρούνται προσωρινά και κόβονται στους αρμούς μεταξύ των τμημάτων μετά την τοποθέτηση του σπονδύλου. Το αποτέλεσμα είναι μία σήραγγα από οπλισμένο σκυρόδεμα με αρθρωτούς συνδέσμους σε τακτικά διαστήματα και ως εκ τούτου υφίστανται πολύ μικρή διαμήκη κάμψη. Η ρωγμάτωση λόγω συρρίκνωσης και θερμικών δράσεων εξαλείφεται, έτσι ώστε να μην απαιτείται εξωτερική μεμβράνη στεγανοποίησης. Για να είναι οι αρμοί των τμημάτων στεγανοί, εισάγεται ένας συνεχής υδροφράκτης εντός του αρμού. Αυτός επιτρέπει την έγχυση ενέματος, έτσι ώστε κάθε πόρος του σκυροδέματος κοντά στις άκρες του υδροφράχτη να σφραγίζεται. Εν τούτοις, πολλοί κύριοι των έργων προτιμούν την πρόσθετη ασφάλεια μιας εξωτερικής υδατοστεγανής μεμβράνης. Σε άλλες περιπτώσεις τα τμήματα συγκολλούνται μεταξύ τους, και προεντείνονται μόνιμα ώστε να διαμορφώνεται ένας μονολιθικός σπόνδυλος σήραγγας.



Σχήμα 12-6. Διατομή της σήραγγας Drogden της ζεύξης του πορθμού του Øresund του (http://en.wikipedia.org/wiki/%C3%98resund_Bridge)

Μια παραλλαγή του μονολιθικού σπονδύλου από οπλισμένο σκυρόδεμα, που όμως σπάνια εφαρμόζεται, είναι ο κατά μήκος μόνιμα προεντεταμένος σπόνδυλος. Αυτός πλεονεκτεί όσον αφορά τον μειωμένο διαμήκη οπλισμό, και το κλείσιμο τυχόν ρωγμών στο σκυρόδεμα από την ασκούμενη θλίψη, που μειώνει την πιθανότητα διαρροής. Ωστόσο, είναι σύνηθες να τοποθετείται μια μεμβράνη στο εξωτερικό της σήραγγας. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι απαιτείται μια επιπλέον δραστηριότητα κατά τη διάρκεια της κατασκευής, και εάν δεν ληφθεί μεγάλη προσοχή στην ενεμάτωση και στις λεπτομέρειες γύρω από την αγκύρωση, η προένταση μπορεί να θέσει σε κίνδυνο τη μακροπρόθεσμη αντοχή της σήραγγας. Μερικές φορές, εξετάζεται η εφαρμογή εγκάρσιας προέντασης.

Οι απαιτήσεις αύξησης της χωρητικότητας των σηράγγων για να διέρχεται περισσότερη κυκλοφορία, απαιτούν αντίστοιχη αύξηση του πλάτους των εσωτερικών διαμερισμάτων. Συνεπώς, οι διατομές από οπλισμένο σκυρόδεμα ενδέχεται να είναι αντιοικονομικές και να απαιτείται εγκάρσια προένταση στο δάπεδο και την οροφή. Η εγκάρσια προένταση, ωστόσο, αυξάνει τον κίνδυνο εμφάνισης προβλημάτων ανθεκτικότητας καθώς οι αγκυρώσεις της προέντασης ενίοτε τοποθετούνται στο εξωτερικό του σπονδύλου και πρέπει να προστατεύονται κατάλληλα. Τα μειονεκτήματα αυτά αποτρέπουν συνήθως τη χρήση μιας τέτοιας προέντασης.

12.3 Σχεδιασμός ζεύξης πορθμού

Κατά τη μελέτη εφικτότητας της εγκάρσιας ζεύξης ενός πορθμού, περιλαμβάνονται ερωτήματα (Lunniss & Baber, 2013), όπως: Τι θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει η ζεύξη; Είναι προτιμότερη η σήραγγα έναντι μιας γέφυρας; Ποια κατασκευή σήραγγας (διάτρησης / βυθισμένη / κοπής και επανεπίχωσης); Ποιες είναι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την κατασκευή; Ποια είναι η ασφάλεια και ποιες οι απαιτήσεις συντήρησης κατά τη λειτουργία. Αν είναι κατάλληλη μια βυθισμένη σήραγγα, τότε τίθενται περαιτέρω ερωτήματα, όπως: Ποιος ο φορέας του σπονδύλου (από χάλυβα / από σκυρόδεμα); Πού θα κατασκευαστούν οι σπόνδυλοι της σήραγγας; Υπάρχουν επιπτώσεις της κατασκευής σε τρίτους;

Η επιλογή μιας γέφυρας ή μιας σήραγγας εξαρτάται από περιβαλλοντικές θεωρήσεις και τη λειτουργία της ναυσιπλοΐας. Μια σήραγγα είναι συνήθως πιο ακριβή από μια γέφυρα, και επομένως για να είναι μια σήραγγα η προτιμώμενη επιλογή, θα πρέπει άλλα οφέλη να αντισταθμίζουν το πρόσθετο κόστος (Lunniss & Baber, 2013). Για παράδειγμα, η θέα σε τοπία ιδιαιτέρου φυσικού κάλους ή σε μνημεία της Παγκόσμιας Πολιτιστικής Κληρονομιάς δύναται να θέσει αρνησικυρία στην κατασκευή ενός επιφανειακού έργου που θα την επηρεάζει. Επίσης, οι υψηλοί πυλώνες των βάθρων μιας γέφυρας μπορεί να μην είναι αποδεκτοί πλησίον αεροδρομίων. Το μεγάλο μήκος προσέγγισης που απαιτείται για μια γέφυρα σιδηροδρομικής μεταφοράς εμπορευμάτων, μπορεί να συνιστά απαράδεκτη οπτική όχληση σε ένα πολύτιμο τοπίο ή να είναι ακατόρθωτο σε μια αστική περιοχή, διότι δεν υπάρχει χώρος διαθέσιμος ή μειώνει το δυναμικό ανάπτυξής της ευρύτερης περιοχής. Σε διαύλους ναυσιπλοΐας το ελεύθερο ύψος κάτω από τη γέφυρα απαιτείται συχνά να είναι 60 m ή και να το υπερβαίνει, και το οδόστρωμα να είναι παραπάνω. Τούτο το ύψος είναι μεγαλύτερο από το βάθος εντός του νερού των εν λόγω πλοίων, το οποίο είναι γενικά στα ~20 m και το οδόστρωμα ~10m πιο κάτω. Έτσι, σε γενικές γραμμές, μια γέφυρα πρέπει να έχει μεγαλύτερο ύψος πάνω από τη στάθμη του νερού από το βάθος μιας σήραγγας κάτω από αυτό. Αυτή η διαφορά κάνει τις προσεγγίσεις στη γέφυρα μακρύτερες από εκείνες που απαιτούνται για μια σήραγγα, η οποία με τη σειρά της αυξάνει το κόστος και επιβαρύνει περισσότερο το τοπίο.

Για συγκοινωνιακή σήραγγα, η επιπυθμένια έχει περισσότερες εναλλακτικές διαμόρφωσης της διατομής σε σχέση με μια σήραγγα διάτρησης. Λωρίδες και διάδρομοι κυκλοφορίας μπορούν να προστεθούν σε μια βυθισμένη σήραγγα, ενώ στις σήραγγες διάτρησης περιορίζονται από τη διάμετρο που μπορεί να κατασκευαστεί. Συχνά οι επιπυθμένιες σήραγγες είναι πολλαπλής χρήσης, όπως σιδηροδρομικής και οδικής συγχρόνως. Όμως, κάθε εσωτερικός χώρος της βυθισμένης σήραγγας πρέπει να αντισταθμίζεται από ισοδύναμο βάρος σκυροδέματος και χάλυβα στη δομή της και αντίστοιχο κόστος, ώστε να παραμένει στη θέση της και να μην επιπλέει. Η εξυπηρέτηση των αναγκών χωρητικότητας της σήραγγας επιτυγχάνεται με την οριζόντια και όχι κατακόρυφη επέκτασή της, λόγω των αυξημένων απαιτήσεων βυθοκόρησης και του αυξημένου μήκους των προσεγγίσεων που συναρτώνται με το βάθος. Μετά την επιλογή της διατομής, σχεδιάζεται η χάραξη, κατά την οποία εντοπίζονται οι περιορισμοί, όπως: (α) Απαιτήσεις σύμβασης, (β) Σύνδεση με την υπάρχουσα υποδομή, (γ) Πλοήγηση στο πλάτος και βάθος του διαύλου ναυσιπλοΐας, (δ) Γεωτεχνικά δεδομένα, (ε) Προστασία πάνω από τη σήραγγα, η οποία καθορίζει το βάθος της στέψης της σήραγγας κάτω από το βυθό, (ς) Περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Μερικοί από αυτούς θέτουν απόλυτους περιορισμούς, ενώ άλλοι δίνουν τη δυνατότητα ανάπτυξης εναλλακτικών επιλογών. Μετά την επιλογή της γενικής χάραξης, αποφασίζεται η θέση σύνδεσης της βυθισμένης σήραγγας με τις επίγειες σήραγγες κοπής και επενεπίχωσης. Ως σημείο εκκίνησης, μπορεί να ληφθεί η θέση όπου η οροφή της σήραγγας συναντά την ίσαλο γραμμή, ώστε να εξασφαλίζεται ότι η οροφή της βυθισμένης σήραγγας είναι πάντα κάτω από το νερό. Η τελική θέση της σύνδεσης, λαμβάνει υπόψη τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των χωματουργικών εργασιών στο θαλάσσιο διάδρομο και το κόστος. Μετά τον καθορισμό του μήκους της βυθισμένης σήραγγας, καθορίζεται ο αριθμός των σπονδύλων της. Αυτός εξαρτάται από τα υδροδυναμικά φορτία κατά τη ρυμούλκηση και βύθιση, από την ικανότητα της μονάδας παρασκευής, από τον αριθμό των βυθίσεων, από την καμπυλότητα της χάραξης,

από τη σεισμικότητα της περιοχής, και από τους περιορισμούς της ναυσιπλοΐας. Γενικά, είναι προτιμότερο, όταν οι συνθήκες του εδάφους το επιτρέπουν, να είναι όλα τα στοιχεία του ιδίου μήκους, ώστε να υπάρχει επανάληψη κατά την παρασκευή και τοποθέτηση.

Συχνά η γνώση της γεωλογίας περιορίζεται στην περιοχή των προσεγγίσεων της σήραγγας. Οι λεπτομερείς έρευνες αφήνονται για την οριστική μελέτη ή το στάδιο μελέτης-κατασκευής του έργου, όταν η συλλογή δεδομένων μπορεί να είναι περισσότερο στοχευμένη. Εφόσον εκτιμάται ότι υπάρχει σκληρό πέτρωμα κάτω από τον υδάτινο δίαυλο, τότε εξετάζεται η δυσκολία στην εκβάθυνση του πυθμένα για τη δημιουργία της υφαλαύλακας. Αυτή μπορεί να εξορυχθεί με το σύγχρονο εξοπλισμό βυθοκόρησης ή εναλλακτικά με ανατίναξη, αν και συχνά δεν προτιμάται ή και απαγορεύεται για περιβαλλοντικούς λόγους. Αντίθετα, μαλακές ποτάμιες προσχώσεις μπορούν εύκολα να εκβαθυνθούν. Ιδανικά, ένα μεγάλο μέρος του υλικού βυθοκόρησης επαναχρησιμοποιείται, είτε ως υλικό επίχωσης είτε σε ένα γειτονικό έργο. Άλλως, εξετάζεται η χρήση του ως υλικού αποκατάστασης. Σε λιμάνια ή αστικές περιοχές, το υλικό του βυθού μπορεί να έχει ρυπανθεί, όπως πχ στο στενό της Σαλαμίνας, και να απαιτεί δαπανηρή επεξεργασία. Δεδομένου ότι μια βυθισμένη σήραγγα είναι ελαφρύ δόμημα που ζυγίζει λιγότερο από το υλικό που αντικαθιστά, αποτελεί ιδανική λύση σε μαλακά υλικά. Εν τούτοις, η ταχεία εναλλαγή των στρωμάτων κατά μήκος της σήραγγας οδηγεί σε διαφορικές καθιζήσεις μεταξύ των σπονδύλων (Grantz, 2001), που μπορεί να απαιτήσει βελτίωση του εδάφους ή χρήση στοιχείων μικρού μήκους. Οι τμηματικοί σπόνδυλοι δύνανται να αναλάβουν χωρίς αστοχία μικρές καθιζήσεις, για μεγαλύτερες διαφορικές καθιζήσεις όμως καταλληλότεροι είναι οι μονολιθικοί σπόνδυλοι.

Ο φορέας της επιπυθμένιας σήραγγας καθορίζεται από μια μελέτη επιλογών που λαμβάνει υπόψη έναν αριθμό παραγόντων, συμπεριλαμβανομένης της ικανοποίησης των απαιτήσεων του εργοδότη, τις δυνατές μεθόδους κατασκευής, την τοποθεσία και τις εγκαταστάσεις που απαιτούνται για την κατασκευή, καθώς και το πρόγραμμα κατασκευής, τον κίνδυνο κατασκευής και το κόστος. Στο αρχικό στάδιο του σχεδιασμού, μπορεί οι επιλογές να είναι ανοικτές και να επιτρέπεται στον ανάδοχο να επιλέξει τη μορφή της σήραγγας. Τότε οι κύριοι παράγοντες που θα καθορίσουν την επιλογή θα είναι συνήθως το κόστος των υλικών και η προτίμηση του αναδόχου για τη δομική μορφή με βάση την εμπειρία του διαθέσιμου εργατικού δυναμικού. Η θέση στην οποία θα παρασκευάζονται τα στοιχεία της σήραγγας αποτελεί σημαντικό παράγοντα για το σχεδιασμό μιας βυθισμένης σήραγγας. Υπάρχουν πολλές επιλογές, όπως (α) μια προς τούτο κατασκευασμένη λεκάνη χύτευσης των σπονδύλων είτε πλησίον είτε εντός της θέσης της σήραγγας ή αλλού απομακρυσμένα από τη θέση, (β) ένα υπάρχον νεώριο ή ναυπηγική εγκατάσταση, (γ) ένα πλωτό νεώριο. Εάν υπάρχουν κατάλληλες ναυπηγικές εγκαταστάσεις, δεν σημαίνει κατ 'ανάγκην ότι θα υιοθετηθεί χαλύβδινη κατασκευή. Το νεώριο που χρησιμοποιείται για τη ναυπήγηση και τη συντήρηση μπορεί να δώσει κατάλληλους χώρους για την κατασκευή σπονδύλων σκυροδέματος της σήραγγας.

Ο σχεδιασμός μιας επιπυθμένιας σήραγγας ακολουθεί τα παρακάτω στάδια (Ingerslev, 2006):

- Προσδιορισμός του πλάτους κυκλοφορίας, που θα συμφωνεί με το πλάτος εκτός της σήραγγας, και του εσωτερικού χώρου σύμφωνα με το περιτύπωμα κυκλοφορίας και τις λοιπές ανάγκες
- Προεκτίμηση του αερισμού
- Αρχική εκτίμηση της διάταξης του χώρου και των παχών των κελυφών
- Προκαταρκτικός σχεδιασμός της χάραξης.
- Λοιπές τεχνικές απαιτήσεις που θα επιτρέπουν την εκτίμηση του βάρους του σπονδύλου
- Μελέτη επίπλευσης
- Δομητική μελέτη του σπονδύλου, της σήραγγας, και αξιολόγηση της διάδρασης Εδάφους-Κατασκευής
- Μελέτη των αρμών
- Μελέτη για τον έλεγχο της ρωγμάτωσης του νεαρού σκυροδέματος
- Οργάνωση της εγκατάστασης των σπονδύλων και της λειτουργίας της σήραγγας

12.4 Το μέλλον

Βυθισμένες σήραγγες θα εξακολουθούν να κατασκευάζονται για τη ζεύξη διαύλων, εκεί όπου θα προσφέρουν πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες μορφές ζεύξεων. Η μέθοδος προσφέρει μια λύση για την διάνοιξη σηράγγων σε μαλακά θαλάσσια ιζήματα, σε πολύ ενεργές σεισμικά περιοχές, σε περιορισμένες αστικές περιοχές, και εκεί όπου υπάρχουν περιβαλλοντικά ευαίσθητες συνθήκες.

Στο μέλλον, οι προκλήσεις θα γίνουν μεγαλύτερες, καθώς θα διευρυνθούν τα όρια της τεχνολογίας. Ειδικότερα, θα κατασκευαστούν βαθύτερες και μακρύτερες σήραγγες και θα επιταχυνθεί ο ρυθμός παραγωγής σπονδύλων, και ως εκ τούτου θα μειωθεί η περίοδος κατασκευής. Τα μήκη των σπονδύλων της σήραγγας επίσης θα αυξηθούν για να διευκολυνθεί αυτή η μείωση. Η πλειοψηφία των βυθισμένων σηράγγων είναι ακόμα μικρού μήκους. Δεν υπάρχει κατασκευαστικό όριο στο μήκος της βυθισμένης σήραγγας, καθώς το μόνο που χρειάζεται είναι να συνδεθούν περισσότεροι σπόνδυλοι σήραγγας μαζί. Περιοριστικός παράγοντας είναι το σύστημα εξαερισμού. Οι σιδηροδρομικές σήραγγες έχουν λιγότερες απαιτήσεις εξαερισμού, από ότι οι οδικές, και γι' αυτό οι πρώτες κατασκευάζονται σε μεγαλύτερα μήκη. Ένα σύστημα εξαερισμού πρέπει να είναι ικανό να εξυπηρετεί μια μακριά σήραγγα και να διασφαλίζει τη διαφυγή σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης.

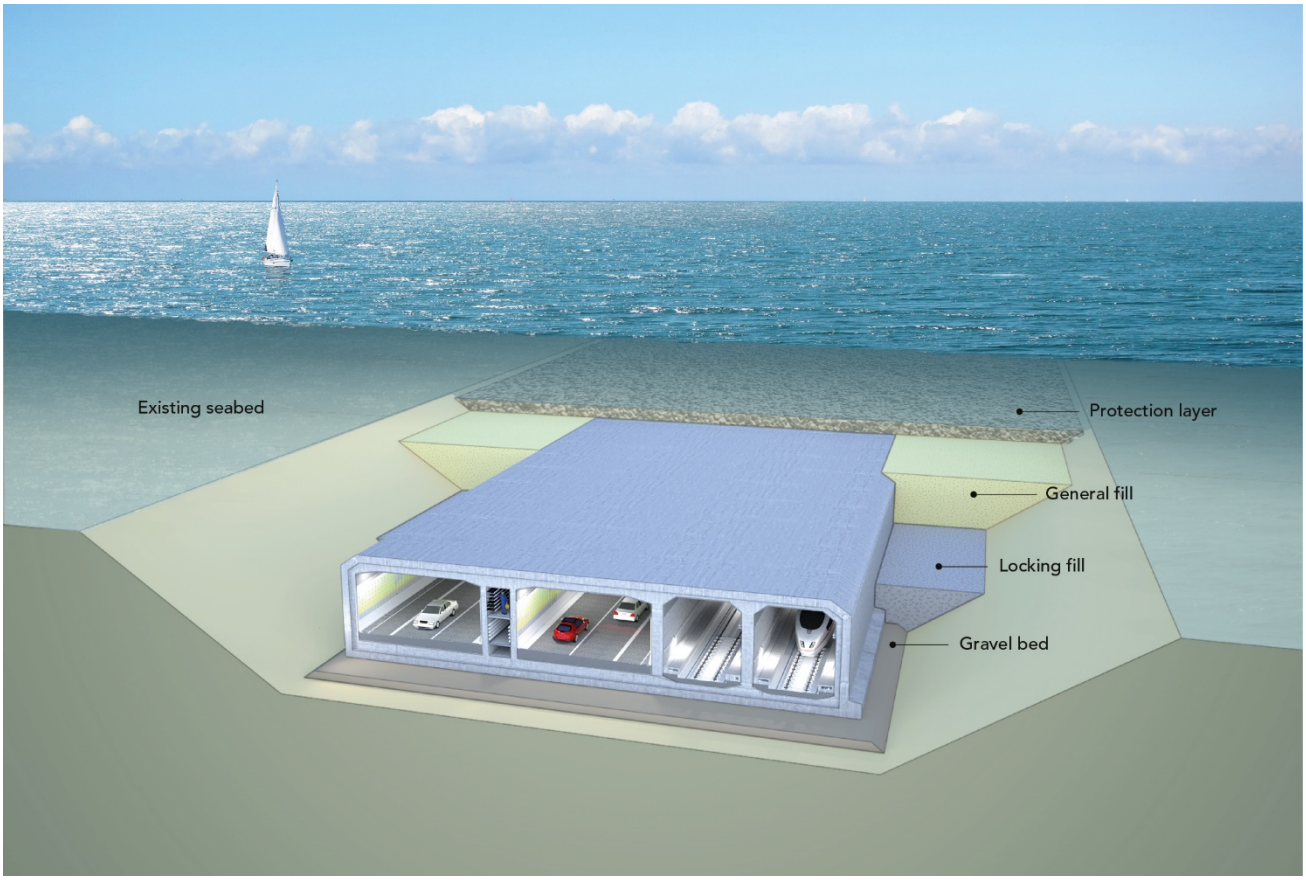
Η μεγαλύτερη βυθισμένη σήραγγα είναι η σιδηροδρομική του BART. Σύντομα θα την ξεπεράσει η μήκους 6km βυθισμένη σήραγγα (Σχήμα 12-7), συστήματος οδικής ζεύξης HZMB (2011) Hong Kong, Macao και ηπειρωτικής Κίνας (Quanke et al., 2011), μήκους 50 km. Θα έχει τρεις λωρίδες κυκλοφορίας διπλής κατεύθυνσης και θα είναι βυθισμένη σε βάθος οροφής ~30 m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, που είναι από τα μεγαλύτερα μέχρι σήμερα.



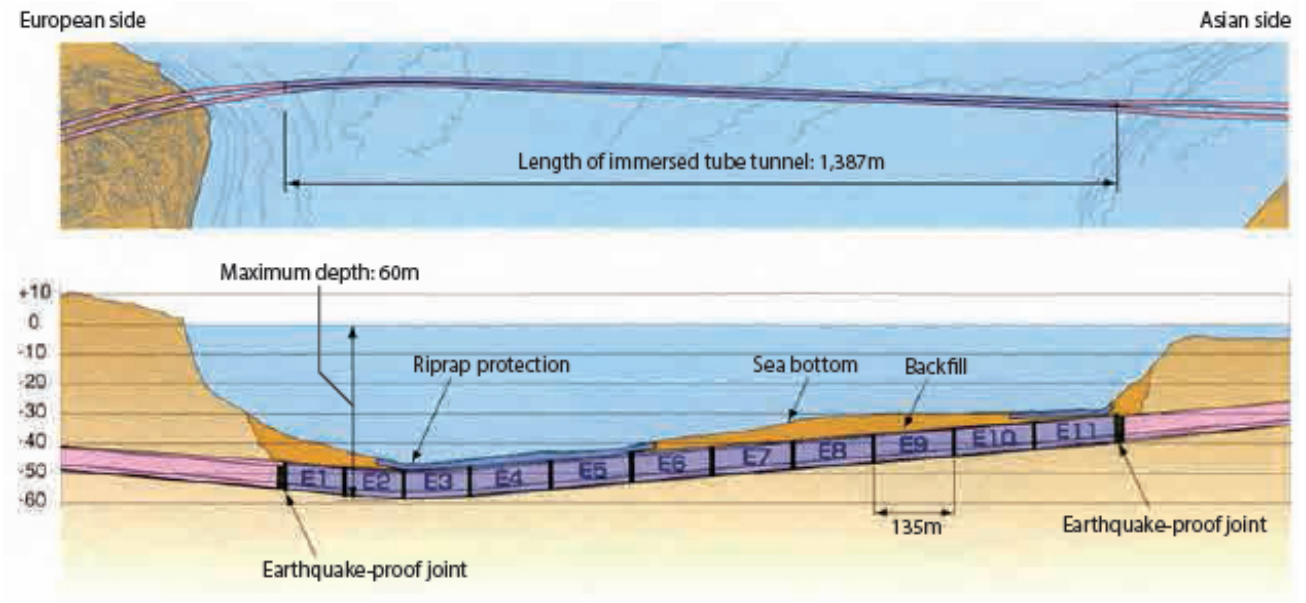
Σχήμα 12-7. Τεχνητή νήσος σύνδεσης γέφυρας και ποντισμένης σήραγγας του συστήματος ζεύξης HZMT (http://tec-tunnel.com/wp-content/uploads/2012/11/Abstract+paper-1615119-Hong-Kong-Zhuhai-Macao-Link.pdf).

Στο στάδιο σχεδιασμού είναι η ποντισμένη οδική και σιδηροδρομική σήραγγα του Fehmarnbelt (Σχήμα 12-8) μήκους 17.6 km για τη σταθερή σύνδεση τη Γερμανίας με τη Δανία. Θα αποτελείται από 89 σπονδύλους μήκους 217 m έκαστος, με μέγιστο βάρος 73500 τόνους, και θα χρειαστεί να εκσκαφθούν ~15.5 εκατομμύρια m^3 εδάφους του βυθού.

Οι βυθισμένες σήραγγες πηγαίνουν βαθύτερα από πριν. Η κατασκευή της βυθισμένης σιδηροδρομικής σήραγγας του Βοσπόρου στην Κωνσταντινούπολη (Σχήμα 12-9), που ολοκληρώθηκε το 2008, έχει το μέγιστο βάθος ρεκόρ των 58 m. Τα χαμηλότερα μέρη των έντεκα σπονδύλων, πλάτους 15.3, ύψους 8.6, και μέγιστου μήκους 135 m, κατασκευάστηκαν σε ξηρά νεωδόχο, και τα ανώτερα τμήματα στη θάλασσα. Στη συνέχεια, οι σπόνδυλοι ρυμουλκήθηκαν 40 km και βυθίστηκαν με ακρίβεια για τη σύνδεση τους στις προκαθορισμένες θέσεις με τη χρήση GPS.



Σχήμα 12-8. Βυθισμένη σήραγγα του Fehmarnbelt (http://www.maritimejournal.com/news101/marine-civils/port,-harbour-and-marine-construction/fehmarnbelt-tunnel-sediment-spill-plan)



Σχήμα 12-9. Σιδηροδρομική ζεύξη του Βοσπόρου (http://www.ocaji.or.jp/en/technology/engineering5.php)

Η κατασκευή της οδικής βυθισμένης σήραγγας Busan-Geoje, που ολοκληρώθηκε το 2010 (Janssen et al. 2006), έχει μέγιστο βάθος 48 μέτρα κάτω από τη μέση στάθμη του νερού. Αποτελείται από 18 σπονδύλους, ~180m έκαστος, βάρους 48000t, και εξωτερικές διαστάσεις διατομής 26.5m x 9.75m (Jensen et al. 2006). Τα βάθη αυτά είναι δυνατόν σύντομα να ξεπεραστούν. Αυτό μπορεί να απαιτεί ιδιαίτερη ανάπτυξη του εξοπλισμού για βυθοκόρηση και για το σχηματισμό των στρωμάτων θεμελίωσης των σηράγγων, αλλά τα μεγάλα έργα υποδομής θα στηρίξουν αυτήν την εξέλιξη. Οι τεχνικές κατασκευής για την τοποθέτηση σπονδύλων της

σήραγγας έχουν ήδη αναπτυχθεί ώστε να είναι σε θέση να τα τοποθετούν σε βάθος, δανειζόμενες τεχνολογία από την υπεράκτια βιομηχανία.

Στα μελλοντικά μεγάλα έργα, η τάση είναι να χρησιμοποιείται σκυρόδεμα για τη συμβατική ζεύξη κάτω από ποτάμια και θάλασσες. Ωστόσο, για βαθύτερες σήραγγες, είναι πιθανόν ότι ο χάλυβας μπορεί να συνεχίσει να χρησιμοποιείται (Lunniss & Baber, 2013) λόγω της ενδογενούς του ολκιμότητας και της ικανότητάς του για τη δημιουργία ισχυρότερων σύμμεικτων δομημάτων που να αντέχουν σε υψηλές πιέσεις νερού.

Βυθισμένες υποπλέουσες σήραγγες (SFTs) ή σηραγγογέφυρες βρίσκονται ακόμη στο στάδιο του σχεδιασμού, αλλά έχει ήδη γίνει σημαντική προσπάθεια για την ανάπτυξή τους από τη δεκαετία του 1990. Αυτός ο τύπος κατασκευής μπορεί να χρησιμοποιηθεί εκεί όπου το βάθος του νερού είναι ακραίο, ώστε η κατασκευή μιας σήραγγας διάτρησης ή βύθισης να μην είναι εφικτή, και ο πορθμός έχει τέτοιο πλάτος ώστε να μην μπορεί να ζευχθεί από μια γέφυρα μεγάλου ανοίγματος. Κλασικό παράδειγμα συνθηκών όπου τα βάθη του νερού είναι εκατοντάδες μέτρα και το μήκος της ζεύξης αρκετά χιλιόμετρα, είναι τα Νορβηγικά φιόρδ. Περιπτώσεις που έχουν μελετηθεί, χωρίς ακόμη όμως να κατασκευαστούν, είναι οι ζεύξεις στο Hogsfjord στη Νορβηγία, στη λίμνη Ουάσιγκτον στην πολιτεία της Ουάσινγκτον, στη λίμνη του Λουγκάνο στην Ελβετία, στα στενά της Μεσσήνης, και σε διάφορες τοποθεσίες στην Ιαπωνία. Η κατασκευή μπορεί είτε να επιπλέει και να κρατείται κάτω από καλώδια στερεωμένα στο βυθό της θάλασσας, έτσι ώστε να παραμένει κάτω από την επιφάνεια του νερού, είτε να βυθίζεται και να υποστηρίζεται από πάνω από πλωτούς προβλήτες ή από κάτω σε στύλους, που στηρίζουν τη σήραγγα στο απαιτούμενο επίπεδο κάτω από την επιφάνεια του νερού.

Η σύγχρονη βυθοκόρηση και επένδυση της επιπυθμένιας σήραγγας προτείνεται από το σύστημα TIMBY (Σχήμα 12-10). Το σύστημα αυτό προτείνει τη χρήση ενός κλειστού TBM για την κατασκευή μιας σήραγγας επενδυμένης από προκατασκευασμένα τόξα, στο βυθό ενός πλωτού υδάτινου διαύλου. Το DOT TBM προετοιμάζει την τάφρο στη χάραξη και ανεγείρει τα τόξα της σήραγγας στην ουρά της.



Σχήμα 12-10. Μέθοδος TIMBY (http://www.tunneltalk.com/TIMBY-Nov09-New-technology.php)

Η άνοδος των ασιατικών οικονομιών στις αρχές του εικοστού πρώτου αιώνα, σημαίνει ότι θα υπάρξει μια αύξηση του αριθμού των έργων που θα κατασκευάζονται στην Ασία. Ωστόσο, η υποδομή της Ευρώπης και της Αμερικής θα απαιτεί συνεχή ανανέωση και επέκταση, και βυθιζόμενες σήραγγες θα συνεχίσουν να χρειάζονται. Η απαίτηση για ανακαίνιση των υπαρχουσών βυθισμένων σηράγγων θα είναι συχνή. Αυτό έχει παρατηρηθεί στις Ηνωμένες Πολιτείες και στην Ευρώπη σε υφιστάμενες σήραγγες, όπου φθάνοντας την ηλικία των 40-50 ετών έχουν ανάγκη για τροποποίηση ή επισκευή για να προσαρμοστούν στα σημερινά πρότυπα και να αναλάβουν τη σύγχρονη κυκλοφορία.

Βιβλιογραφία

Glerum A (1995). "Developments in immersed tunnelling in Holland". *TUST*, Vol. 10, No. 4, pp. 455–462.

Grantz W (1997). "Steel shell immersed tunnels—40 years of experience", TUST, 12, 1, pp. 23–31.

Grantz W (2001). "Immersed tunnel settlements: Part 1—Nature of settlements", TUST, 16, pp. 195–201.

Gursoy A (2004). "Immersed steel tube tunnels", in Tunnel Engineering Handbook, ed. Bickel JO, Kuesel TR King EH, Kluwer Ac Publishers, p. 268÷290.

Hakkaart CJA, & Hart W (2003). "Dutch high speed railway immersed tunnel projects", *(Re)Claiming the Underground Space*, Vol. 1, pp. 291–296, published by AA Balkema, Proceedings of the ITA World Tunnelling Congress, Amsterdam, the Netherlands.

Ingerslev Ch (2006). "Designing an Immersed Tunnel", PB Network #62 February.

ITA (1999). "*Immersed Tunnels: A Better Way to Cross Waterways"*, Tribune, special edition, May.

ITA (2011). "*An Owner's Guide to Immersed Tunnels"*, Baber J (ed.), Working Group 11 for Immersed and Floating Tunnels, International Tunnelling and Underground Space Association, Lausanne, Switzerland. ISBN 978-2-97000624-5-5.

Janssen W, & Lykke S (1997). "The fixed link across the Øresund: Tunnel section under the Drogden", *TUST*, 12, 1, pp. 5–14.

Janssen W, De Haas P, & Yoon YH (2006). "Busan-Geoje Link: Immersed tunnel opening new horizons", Proceedings of the World Tunnel Congress and 32nd ITA Assembly, Seoul, Korea, 22–27 April & TUST, 21, 3–4, p. 333.

Jensen OP, Olsen TH, Kim CW, Heo JW, & Yang BH (2006). "Busan–Geoje Project South Korea: Construction of immersed tunnel in off-shore wave conditions", *TUST*, 21, 3–4, p. 333.

Kimura H, Kojima I, & Moritaka H (2002). "*Development of Sandwich-Structure Submerged Tunnel Tube Production Method"*, Nippon Steel Technical Report No. 86, July.

Kiyomiya O, Higashijima Y, Ohgoshi Y, & Yokota H (2006). "New type flexible joint for the Yumeshima immersed tunnel", *TUST*, 21, 3–4, p. 333.

Lunniss R and Baber J (2013). "Immersed tunnels", CRC Press, Taylor & Francis Group, Spon Book.

Munfah NA. and Tarhan YM (1990).. "*Immersed Tunnel Techniques", Proceedings of the conference organized by ICE*, p.327, Manchester, April 11–13, 1989. ISBN 0-7277-1512-7. Thomas Telford Ltd, London,

Narayanan R, Bowerman H, & Naji F (1997). "*Application of Guidelines for Steel-Concrete-Steel Sandwich Construction: 1: Immersed Tube Tunnels"*, Publication No. 132, Steel Construction Institute, UK. ISBN 9781859420133.

Øresund (2000). "Øresund Link Immersed Tunnel", Proceedings of the Conference, Copenhagen, Denmark, April 5–7, 2000. Øresunds-konsortiet, Øresund Tunnel Contractors I/S, and ITA.

Quanke S, Yue C, Li Y, & de Wit JCWM (2011). “China’s Hong Kong Zhuhai Macao Bridge (HZMB) link”, Stretching the limits of immersed tunnelling. In Proceedings of ITA 37th General Assembly and World Tunnel Congress, Helsinki.

Rasmussen N (1997). “Concrete immersed tunnels—40 years of experience”, *TUST*, 12, 1, pp. 33–46.

Κριτήρια αξιολόγησης

Κριτήριο αξιολόγησης 1

Η σήραγγα Άκτιο-Πρέβεζα κατασκευάζεται με πόντιση σωλήνων. (α) Σχεδιάστε τη μηκοτομή και την εγκάρσια τομή ενός σπονδύλου της. (β) Υπολογίστε το βάρος του και τη βύθισή του κατά τη ρυμούλκιση. (γ) Σχεδιάστε την υφαλαύλακα τοποθέτησής του. (δ) Εκτιμείστε τον απαιτούμενο μηχανολογικό εξοπλισμό για την όρυξη της υφαλαύλακας

Απάντηση/Λύση

Κεφάλαιο 13

Σύνοψη
Δεδομένης της αβεβαιότητας των γεωτεχνικών παραμέτρων και των απλουστεύσεων των αναλύσεων της συμπεριφοράς των υπογείων διανοίξεων, απαιτείται η γεωτεχνική παρακολούθηση τόσον κατά τη διάνοιξη, όσον και πριν και μετά από αυτήν. Προς τούτο χρησιμοποιούνται όργανα μέτρησης μήκους και πίεσης/δύναμης. Η παρακολούθηση συντελεί είτε στην επιβεβαίωση της ασφάλειας του έργου είτε στην απαίτηση τροποποίησης της μελέτης/κατασκευής, εφόσον οι προβλεπόμενες τιμές αποκλίνουν από τις μετρούμενες. Ειδικότερη περίπτωση μετρήσεων αποτελούν οι επιφανειακές καθιζήσεις, που δεν θα πρέπει να ξεπερνούν κάποια όρια προκειμένου να εξασφαλίζονται από ζημιές οι επίγειες κατασκευές. Αναπτύσσονται τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα όργανα και οι θέσεις τοποθέτησής τους. Εμπέδωση επιτυγχάνεται με λυμένα παραδείγματα και ασκήσεις.

Προαπαιτούμενη γνώση
Μαθήματα: Υποστήριξη υπογείων έργων, Εδαφομηχανική, Χρήσιμη βιβλιογραφία: Γεωργιάνου (2000), Dunnicliff (1990).

13. Γεωτεχνική παρακολούθηση

13.1 Εισαγωγή

Η παρακολούθηση της βραχομάζας, πραγματοποιείται είτε οπτικά είτε με τη βοήθεια οργάνων και αποσκοπεί στο να:

- καταγράψει τις τιμές γεωτεχνικών παραμέτρων, όπως το επίπεδο στάθμης των υπογείων υδάτων, πριν από την έναρξη κατασκευής του έργου.
- εξασφαλίσει ασφάλεια κατά τη διάρκεια της κατασκευής και της λειτουργίας του έργου με την προειδοποίηση π.χ. της καταγραφής υπερβολικών παραμορφώσεων, πιέσεων ύδατος και φόρτισης των στοιχείων υποστήριξης.
- ελέγξει την ισχύ των υποθέσεων, των προτύπων και των τιμών των παραμέτρων της βραχομάζας που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς της μελέτης.
- ελέγξει την αποτελεσματικότητα της βελτίωσης του εδάφους, όπως της ψύξης, της ενεμάτωσης, της αποστράγγισης και της αγκύρωσης.

13.1.1 Μετρούμενα μεγέθη

Η βραχομάζα είναι εξαιρετικά σύνθετο μέσο του οποίου οι μηχανικές ιδιότητες είναι δύσκολο να προκαθοριστούν. Τα πρότυπα που χρησιμοποιούνται για να προβλέψουν την απόκρισή της στην εκμετάλλευση είναι βασισμένα σε εξιδανικεύσεις, υποθέσεις και απλοποιήσεις. Είναι επομένως απαραίτητο, να ελέγχεται η αξιοπιστία της μελέτης. Η παρακολούθηση της συμπεριφοράς της βραχομάζας που περιβάλλει το υπόγειο έργο αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα της διαδικασίας εκτέλεσης ενός υπογείου έργου. Σε μερικές περιπτώσεις, ο σχεδιασμός μπορεί να βασιστεί κατά ένα μεγάλο μέρος στα αποτελέσματα της παρακολούθησης δοκιμαστικών στοών ή της συμπεριφοράς της διάνοιξης στα αρχικά στάδια πραγματοποίησής της, χωρίς να βασίζεται σε ακριβείς υπολογισμούς. Αυτή η χρήση της επί τόπου παρατήρησης της συμπεριφοράς των γεωτεχνικών έργων είναι γνωστή ως «μέθοδος της παρατήρησης». Τα συστήματα παρακολούθησης που χρησιμοποιούνται στα μεγάλης κλίμακας σύγχρονα υπόγεια έργα μπορεί να είναι περίπλοκα και ακριβά. Εντούτοις, πρέπει να αναφερθεί ότι πολύτιμα συμπεράσματα για την απόκρισή τους μπορούν συχνά να συναχθούν από οπτικές παρατηρήσεις ή από

παρατηρήσεις που γίνονται χρησιμοποιώντας απλές συσκευές. Τα στοιχεία που μπορούν να παρακολουθηθούν σε μια υπόγεια διάνοιξη (Brady and Brown, 1985) περιλαμβάνουν:

- Θραύση ή ολίσθηση του πετρώματος στο όριο εκσκαφής (παρατηρείται οπτικά).
- Μετακίνηση κατά μήκος μιας ασυνέχειας
- Σχετική μετατόπιση ή σύγκλιση δύο σημείων στο όριο εκσκαφής.
- Μετατοπίσεις που εμφανίζονται μέσα στη βραχομάζα μακριά από το όριο εκσκαφής.
- Μετατοπίσεις ή καθιζήσεις της επιφάνειας
- Αλλαγές στην κλίση μιας γεώτρησης με το βάθος.
- Στάθμη υπογείων υδάτων, πίεση και ροή.
- Μεταβολές της ορθής τάσης σε ένα σημείο της βραχομάζας.
- Μεταβολές της φόρτισης των στοιχείων υποστήριξης, όπως των πλαισίων και των αγκυρίων
- Ορθές τάσεις και πιέσεις ύδατος σε επιχώματα και λιθογομώσεις.
- Καθιζήσεις επιχωμάτων.
- Μικροσεισμικές εκπομπές.
- Ταχύτητες διάδοσης κυμάτων.

Μολονότι, από αυτόν τον κατάλογο μπορεί να φανεί ότι ευρύ φάσμα μεταβλητών μπορεί να μετρηθεί, μόνο δύο βασικές φυσικές αποκρίσεις, η μετατόπιση και η πίεση, μπορούν να μετρηθούν σχετικά άμεσα χρησιμοποιώντας την τρέχουσα τεχνολογία. Οι μετρήσεις μπορεί να αφορούν *απόλυτες μετατοπίσεις* μιας σειράς σημείων στα όρια μιας εκσκαφής ή μέσα στη βραχομάζα. Η σχετική μετατόπιση, *σύγκλιση***,** δύο σημείων στο όριο μιας εκσκαφής μετρείται ευκολότερα από την απόλυτη μετατόπιση. Επειδή η σχετική μετατόπιση δύο σημείων μπορεί συνήθως να μετρηθεί, μια μέτρηση *της ορθής τροπής* μπορεί να ληφθεί με την υπόθεση ότι η τροπή είναι ομοιόμορφη στο μήκος της μέτρησης. *Η πίεση* στο υπόγειο νερό και η ορθή τάση στην επαφή βράχος-υποστήριξη ή σε επίχωμα μπορεί να μετρηθεί από την πίεση που προκαλείται σε αισθητήρα πίεσης. Κατά αυτόν τον τρόπο μετρείται η μέση τιμή της ορθής τάσης στην επιφάνεια του αισθητήρα.

Η μέτρηση των περισσότερων άλλων μεταβλητών, απαιτεί τη χρήση μαθηματικών προτύπων και ιδιοτήτων των υλικών (π.χ. ελαστικές σταθερές) προκειμένου να υπολογισθούν από μετρημένες μετατοπίσεις, παραμορφώσεις ή πιέσεις. Επομένως, προκειμένου να γίνονται συγκρίσεις και να λαμβάνονται αποφάσεις, είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούνται άμεσα μετρήσιμες ποσότητες παρά ποσότητες που υπολογίζονται με τη βοήθεια μαθηματικού προτύπου που χρησιμοποιεί τις μετρούμενες ποσότητες ως παραμέτρους εισαγωγής.

13.1.2 Χαρακτηριστικά γνωρίσματα

Το ενόργανο σύστημα, που χρησιμοποιείται για να παρακολουθήσει μια δεδομένη μεταβλητή, περιέχει γενικά τρία συστατικά: Έναν *αισθητήρα* που αποκρίνεται στις αλλαγές της μεταβλητής που παρακολουθείται. Ένα *σύστημα διαβίβασης,* που χρησιμοποιεί ράβδους, ηλεκτρικά καλώδια, υδραυλικούς σωλήνες ή συσκευές ράδιο-τηλεμετρίας και διαβιβάζει την έξοδο του αισθητήρα στη θέση ανάγνωσης. Μια μονάδα *ανάγνωσης* ή/και *καταγραφής,* όπως ένας ωρολογιακός μετρητής, μετρητής πίεσης, ψηφιακή οθόνη ή καταγραφικό μαγνητικών ταινιών, και μετατρέπει τα στοιχεία σε μια χρησιμοποιήσιμη μορφή παρουσίασης. Προκειμένου να εκπληρώνει το σύστημα παρακολούθησης την λειτουργία του οικονομικά και αξιόπιστα, θα πρέπει να έχει:

- εύκολη εγκατάσταση, ακόμη και κάτω από αντίξοες συνθήκες
- επαρκή ευαισθησία, ακρίβεια και επαναληπτικότητα των μετρήσεων
- ευρωστία και κατάλληλη προστασία που θα το εξασφαλίζει κατά την περίοδο λειτουργίας
- ευκολία της ανάγνωσης και άμεση διαθεσιμότητα των στοιχείων
- αμελητέα παρέμβαση στην εκμετάλλευση.

Οι όροι (Γεωργιάνου, 2000) ακρίβεια (accuracy), σφάλμα (error), επαναληπτικότητα (precision, repeatability) ευαισθησία (sensitivity) και διακριτότητα (resolution), απαιτούν προσεκτικό ορισμό.

Η *ακρίβεια* ενός οργάνου εκφράζει την απόκλιση της τιμής μέτρησης μιας παραμέτρου από την πραγματική της τιμή. Η ακρίβεια εκφράζεται συνήθως ως ποσοστό και αναφέρεται σε όλο το εύρος

λειτουργίας του οργάνου. Για παράδειγμα, σε ένα μετρητή πίεσης 10 MPa που έχει ακρίβεια 1% FS (full scale), οι μετρήσεις είναι δυνατόν να αποκλίνουν 1% της μεγίστης πιθανής τιμής μέτρησης και όχι της μετρούμενης τιμής, δηλαδή, ±100kPa.

Το *σφάλμα* είναι η διαφορά μεταξύ της παρατηρηθείσας ή υπολογισμένης τιμής και της πραγματικής τιμής. Τα σφάλματα μπορούν να είναι είτε συστηματικά είτε τυχαία.

Η *επαναληπτικότητα* αναφέρεται σε ένα αριθμό μετρήσεων της πραγματικής τιμής μιας παραμέτρου και αφορά την απόκλιση κάθε μίας από τις μετρήσεις από τη μέση τιμή. Επομένως η επαναληπτικότητα αντανακλά τη δυνατότητα επαναπροσδιορισμού μίας μέτρησης. Η επαναληπτικότητα εκφράζεται από ένα αριθμό με την προσθήκη του προσθεταφαιρετικού συμβόλου. Μπορεί επομένως να οριστεί ως η εγγύτητα της προσέγγισης κάθε μίας από παρόμοιες μετρήσεις στον αριθμητικό μέσο όρο.

Η *ευαισθησία* αναφέρεται στην έξοδο ενός οργάνου μέτρησης η οποία αντιστοιχεί στην επιβαλλόμενη είσοδο, π.χ. η ευαισθησία ενός οργάνου μέτρησης παραμόρφωσης (LVDT) είναι 1.5 V ανά 30mm. Για την ίδια είσοδο το κάθε όργανο έχει διαφορετική έξοδο και το όργανο με τη μεγαλύτερη ευαισθησία εμφανίζει και τη μεγαλύτερη έξοδο. Μεγάλη ευαισθησία δεν σημαίνει και μεγάλη ακρίβεια η επαναληπτικότητα.

Άλλοι όροι που χρησιμοποιούνται είναι η διακριτότητα (resolution), η αναγνωσιμότητα (readability), η ελάχιστη μέτρηση (least count), το εύρος, η συμβατότητα, η γραμμικότητα, η υστέρηση και ο θόρυβος.

13.1.3 Λειτουργία

Οι τρόποι λειτουργίας των συστημάτων αίσθησης, μετάδοσης και ανάγνωσης που χρησιμοποιούνται στις συσκευές παρακολούθησης, μπορεί να είναι μηχανικοί, οπτικοί, υδραυλικοί ή ηλεκτρικοί (Dunnicliff, 1990). Τα *μηχανικά* συστήματα παρέχουν συχνά τις απλούστερες, φτηνότερες και πιο αξιόπιστες μεθόδους. Οι μηχανικοί αισθητήρες μετακίνησης χρησιμοποιούν μια ράβδο ή μια ταινία χάλυβα, πακτωμένη στο πέτρωμα από τη μία πλευρά, και σε επαφή με έναν ωρολογιακό ή ηλεκτρικό μετρητή από την άλλη. Το κύριο μειονέκτημα των μηχανικών συστημάτων είναι ότι δεν δίνουν τη δυνατότητα απομακρυσμένης ανάγνωσης ή συνεχούς καταγραφής.

Τα *οπτικά* συστήματα χρησιμοποιούνται για την καταγραφή με συμβατικές η φωτογραμμετρικές μεθόδους του περιγράμματος της εκσκαφής, της μετακίνησης στα όρια της εκσκαφής, και της ύπαρξης φυσικών ή επιγενομένων θραύσεων. Αυτές οι μέθοδοι χρησιμοποιούνται επίσης για την παρακολούθηση της καθίζησης της επιφάνειας λόγω της υπόγεια εξόρυξης.

Οι *υδραυλικοί* και *πνευματικοί* διαφραγματικοί μορφοτροπείς χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση των πιέσεων ύδατος, των φορτίων υποστήριξης, των φορτίων των αγκυρίων, της ορθής συνιστώσας της τάσης και των καθιζήσεων. Σε όλες τις περιπτώσεις η μέθοδος λειτουργίας είναι η ίδια. Η ποσότητα που μετρείται είναι η πίεση του υγρού που ενεργεί στη μια πλευρά ενός εύκαμπτου διαφράγματος φτιαγμένου από μεταλλικό, ελαστικό ή πλαστικό υλικό. Δίδυμοι σωλήνες συνδέουν το όργανο ανάγνωσης με την άλλη πλευρά του διαφράγματος. Για να ληφθούν οι αναγνώσεις, πίεση αέρα, αζώτου ή υδραυλικού ελαίου παρέχεται από τη μονάδα ανάγνωσης μέσω ενός από τους σωλήνες στο διάφραγμα. Όταν η πίεση παροχής είναι επαρκής για να εξισορροπήσει την πίεση που μετρείται, το διάφραγμα ενεργεί ως βαλβίδα και επιτρέπει τη ροή μέσω του σωλήνα επιστροφής σε έναν αισθητήρα στη μονάδα ανάγνωσης. Η πίεση ισορροπίας καταγράφεται συνήθως σε έναν τυποποιημένο μετρητή Bourdon ή μια ψηφιακή οθόνη.

Οι *ηλεκτρικές* συσκευές παρέχουν την πιο συνήθη βάση των οργάνων που χρησιμοποιούνται σήμερα για να παρακολουθήσουν τη συμπεριφορά των πετρωμάτων που περιβάλλουν τα υπόγεια έργα, αν και τα μηχανικά συστήματα βρίσκουν ακόμα διαδεδομένη χρήση στον έλεγχο των μετατοπίσεων. Τα ηλεκτρικά συστήματα λειτουργούν γενικά στη μια από τρεις βασικές αρχές.

Οι *μετρητές παραμόρφωσης ηλεκτρικής αντίστασης* λειτουργούν σε μια αρχή που ανακαλύφθηκε από τον Kelvin, δηλαδή ότι η αντίσταση ενός καλωδίου αλλάζει αναλογικά με την παραμόρφωση. Οι μετρητές παραμόρφωσης που κατασκευάζονται από λεπτό μεταλλικό σύρμα ή φύλλο, επικολλούνται σε μια επιφάνεια βράχου, σκυροδέματος ή χάλυβα. Οι μεταβολές στις παραμορφώσεις του υλικού συνοδεύονται από μεταβολές στις παραμορφώσεις, και αντιστάσεις, των μετρητών παραμόρφωσης που διαβάζονται χρησιμοποιώντας ένα κύκλωμα γεφυρών Wheatstone. Τα περισσότερα κύτταρα φορτίου, πολλοί μορφοτροπείς πίεσης και μερικοί τύποι αποκλισιομέτρων χρησιμοποιούν επίσης τους μετρητές παραμόρφωσης ηλεκτρικής αντίστασης. Τα σημαντικότερα μειονεκτήματα που συνδέονται με τη χρήση των μετρητών παραμόρφωσης ηλεκτρικής αντίστασης στις εφαρμογές της βραχομηχανικής, είναι:

- η δυσκολία να επιτευχθεί και διατηρηθεί μία καλή κόλληση μεταξύ του μετρητή και του πετρώματος.
- το μικρό σχετικά μήκος των μετρητών στο οποίο μετρούνται οι παραμορφώσεις
- οι θερμοκρασιακές επιδράσεις που δεν μπορούν πάντα να εξαλείφονται.

Οι αισθητήρες *δονούμενης χορδής* είναι βασισμένοι στο γεγονός ότι η φυσική συχνότητα δόνησης f, ενός τανημένου σύρματος μήκους l_w και πυκνότητας ρ σχετίζεται, με την εφελκυστική τάση σ_w στο σύρμα, με την εξίσωση:

$$f = \frac{1}{2l_w}\sqrt{\frac{\sigma_w}{\rho}} = \frac{1}{2l_w}\sqrt{\frac{E_w \cdot \varepsilon_w}{\rho}} \Rightarrow \varepsilon_w = \frac{4L^2 f^2 \rho}{E_w} = K \cdot f^2$$

(13-1)

όπου ε_w, E_w η παραμόρφωση και το μέτρο ελαστικότητας του σύρματος.

Η συχνότητα μετρείται από ηλεκτρομαγνητικό πηνίο, και υπολογίζεται η τάση. Αυτή η τιμή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καθοριστεί η πίεση που ασκείται σε ένα διάφραγμα με το οποίο ένα άκρο της χορδής είναι συνδεμένο, ή το αξονικό φορτίο σε ένα κύτταρο φορτίου στο οποίο είναι τοποθετημένη η δονούμενη χορδή. Συστήματα δονούμενης χορδής χρησιμοποιούνται στα πιεζόμετρα, στα κύτταρα εδαφικής πίεσης, στους μετρητές τάσης και στα κύτταρα φορτίου.

Οι έξοδοι των αισθητήρων δονούμενης χορδής είναι συχνότητες και όχι τάσεις ή εντάσεις ρεύματος. Αυτό είναι ένα πλεονέκτημα δεδομένου ότι η συχνότητα είναι ευκολότερο να διαβιβαστεί σε μεγάλες αποστάσεις χωρίς παραμόρφωση από ότι είναι το αναλογικό σήμα. Οι απαριθμήσεις συχνότητας μπορούν συνήθως να διαβιβαστούν αξιόπιστα ακόμη και παρουσία ισχυρού παρασιτικού θορύβου. Οι αισθητήρες δονούμενης χορδής έχουν επίσης άριστη μακροχρόνια σταθερότητα.

Τα όργανα *αυτεπαγωγής* είναι βασισμένα στην αμοιβαία αυτεπαγωγή ζεύγους ομοαξονικών σωληνοειδών που διαμορφώνουν ένα κύκλωμα συντονισμένης συχνότητας:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}$$

(13-2)

Όπου, L είναι η αυτεπαγωγή και C η χωρητικότητα των σωληνοειδών. Μια σχετική μετατόπιση d των εσωτερικών και εξωτερικών σωληνοειδών μεταβάλλει τη μετρούμενη συχνότητα συντονισμού f, έτσι ώστε:

$$d = K \cdot \sqrt{1 - \frac{f_o^2}{f^2}}$$

(13-3)

όπου f_o η βαθμονομημένη συχνότητα για τη μηδενική θέση και K σταθερά. Μια σειρά επιμηκυνσιομέτρων και αποκλισιομέτρων σε γεώτρηση είναι βασισμένα σε αυτήν την αρχή. Αυτά τα όργανα μπορούν να αναγνωστούν από μακριά χρησιμοποιώντας ράδιο-τηλεμετρία.

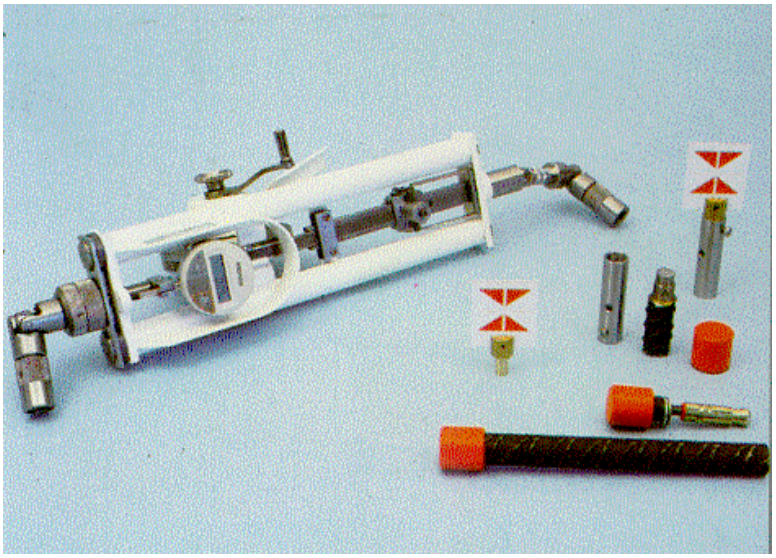
Ο *διαφορικός μετατροπέας γραμμικής μεταβολής, LVDT,* λειτουργεί επίσης σε μια αρχή αμοιβαίας αυτεπαγωγής. Εντούτοις, παράγει ως σήμα εξόδου μια τάση και όχι μια συχνότητα. Η τάση αυτή είναι άμεσα ανάλογη προς τη γραμμική μετατόπιση ενός σιδηρού πυρήνα κατά μήκος του άξονα του οργάνου.

13.2 Μετρητές

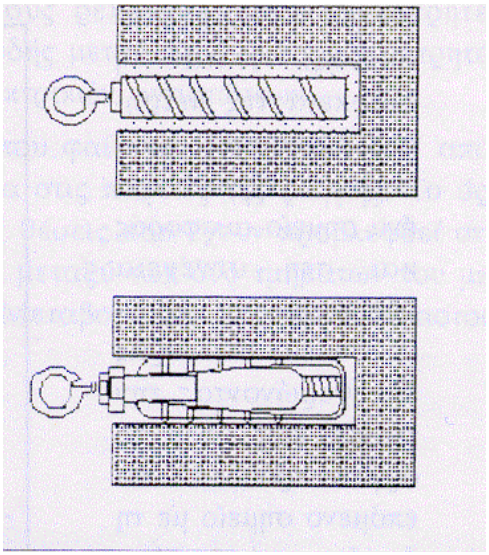
Στα υπόγεια έργα χρησιμοποιούνται διάφορα όργανα μέτρησης της μετατόπισης, της παραμόρφωσης, της πίεσης, των δονήσεων, κλπ. Η συνεχής αξιολόγηση των μετρήσεων είναι δυνατόν να συντελέσει αφενός μεν στην ασφαλέστερη κατασκευή αφετέρου δε στην οικονομία του έργου.

13.2.1 Συγκλισιόμετρα

Σύγκλιση ονομάζεται η σχετική μετατόπιση δύο σημείων στο όριο μιας εκσκαφής. Η μέτρηση πραγματοποιείται, με τηλεσκοπική ράβδο ή ράβδο invar ή ταινία κάτω από σταθερή ένταση (Σχήμα 13-1), που τοποθετείται μεταξύ δύο σημείων μέτρησης στην επιφάνεια του πετρώματος. Ένας ωρολογιακός μετρητής, ένα μικρόμετρο, ή μια ηλεκτρική συσκευή όπως ένα LVDT, χρησιμοποιούνται για να λάβουν τη μέτρηση της σχετικής μετατόπισης. Στο Σχήμα 13-2 φαίνεται η μέτρηση των συγκλίσεων μίας σήραγγας. Σήμερα προτιμάται να μετρείται οπτικά, αντί της σύγκλισης, η απόλυτη μετατόπιση σημείων στην περιφέρεια της σήραγγας.



(α) Συσκευή και πείροι

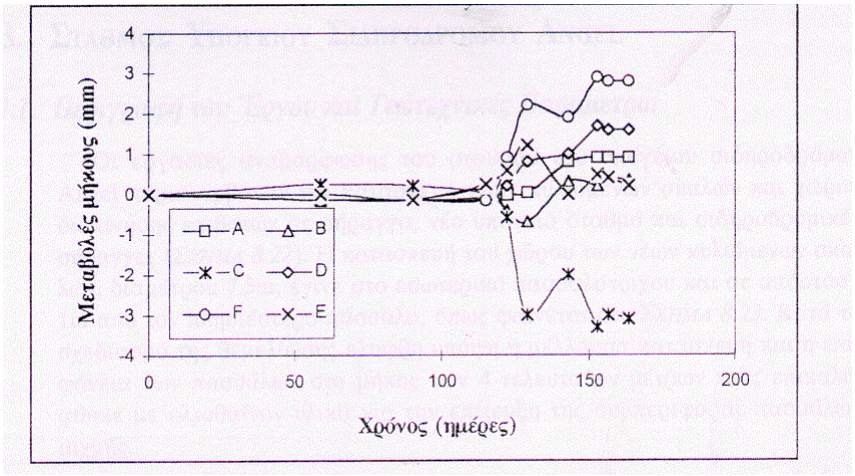


(β) Πείροι τοποθετημένοι

Σχήμα 13-1. Συγκλισιόμετρο ταινία (SISGEO, 2001)



(α) Λήψη μετρήσεων



(β) Διάγραμμα εξέλιξης συγκλίσεων

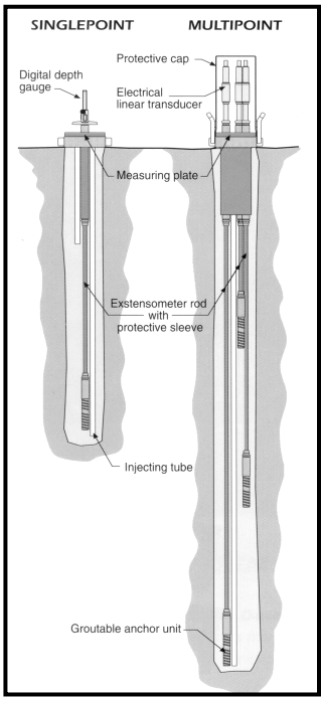
Σχήμα 13-2. Μετρήσεις σύγκλισης σε κυκλική σήραγγα

13.2.2 Επιμηκυνσιόμετρα γεώτρησης

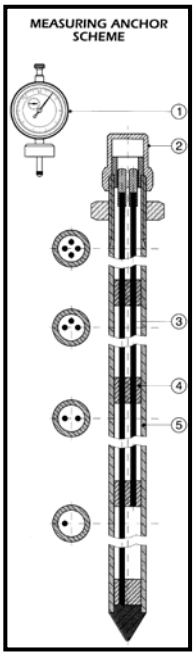
Το επιμηκυνσιόμετρο (ή μηκυνσιόμετρο διατρήματος ή εκτασιόμετρο) ενός σημείου δίνει τη σχετική μετατόπιση μεταξύ σημείου πακτωμένου στη βραχομάζα και σημείου μέτρησης, που βρίσκεται γενικά στο όριο εκσκαφής. Ένα επιμηκυνσιόμετρο (MPBX) πολλαπλών σημείων (Σχήμα 13-3) μπορεί να δώσει τις σχετικές μετατοπίσεις μεταξύ διάφορων σημείων κατά μήκος της γεώτρησης (Hanna, 1985). Κατ' αυτό τον τρόπο μπορεί να καταγραφεί, η κατανομή των μετατοπίσεων με το βάθος στο πέτρωμα. Μερικές φορές οι μετρήσεις σύγκλισης πραγματοποιούνται μεταξύ των κεφαλών των MPBX. Οι προτεινόμενες μέθοδοι για την

παρακολούθηση των μετατοπίσεων στο πέτρωμα με χρήση επιμηκυνσιομέτρων γεώτρησης δίνονται από την επιτροπή τυποποίησης εργαστηριακών και επί τόπου δοκιμών της ISRM (Brown, 1981). Προτείνεται για τις μεγάλες υπόγειες εκσκαφές, το ελάχιστο εύρος να είναι 50 mm (300 mm με επανεκκίνηση), η επαναληπτικότητα 0.25-2.5 mm, και η ευαισθησία του οργάνου 0.25-1.00 mm.

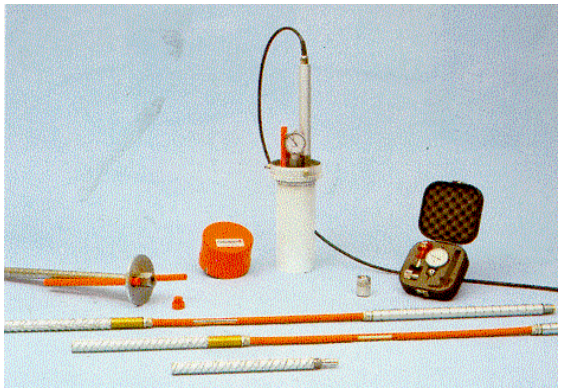
Το ηλεκτρικό επιμηκυνσιόμετρο λειτουργεί στην αρχή της αυτεπαγωγής. Αποτελείται από μια κεντρική ράβδο που πακτώνεται στο ένα άκρο του διατρήματος και φέρει ένα σύνολο αισθητήρων μετατόπισης με αυτεπαγωγή που περνούν μέσα από ομοαξονικούς δακτυλίους στερεωμένους σε επιλεγμένα σημεία του πετρώματος με ελατήρια. Η σχετική μετακίνηση μεταξύ του αισθητήρα και του δακτυλίου σε οποιοδήποτε σημείο κατά μήκος του άξονα τροποποιεί τη συχνότητα συντονισμού του κυκλώματος. Η μονάδα ανάγνωσης είναι βαθμονομημένη ώστε να δίνει άμεση ανάγνωση της μετατόπισης. Τα διαστήματα των αισθητήρων μπορούν να είναι >1m και η γεώτρηση μπορεί να είναι σε οποιαδήποτε κλίση. Ηλεκτρικά και μαγνητικά επιμηκυνσιόμετρα πολλαπλών σημείων δύνανται να μετρώνται και από βυθιζόμενη βολίδα.



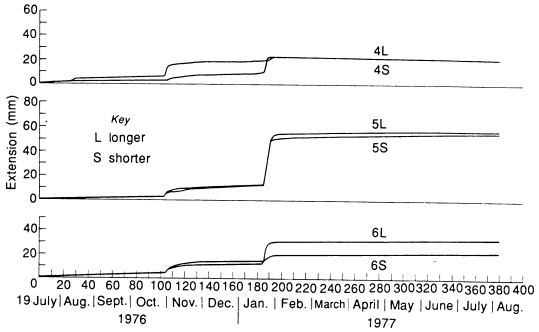
(α) Τοποθετημένα επιμηκυνσιόμετρα ενός και πολλαπλών σημείων



(β) Μετρητικό αγκύριο 1 Ωρολογιακός μετρητής, 2 Κάλυμμα, 3 Μετρητική ράβδος, 4 Διατομή αγκύρωσης, 5, Σώμα αγκυρίου



(γ) Επιμηκυνσιόμετρο



(δ) Εξέλιξη μετρήσεων από τρεις γεωτρήσεις

Σχήμα 13-3. Μετρήσεις μέσα σε γεώτρηση

13.2.3 Μετρητικά αγκύρια

Το μετρητικό αγκύριο (Σχήμα 13-3, μέσον) έχει ένα κεντρικό δακτύλιο μέσα στον οποίο είναι τοποθετημένα δύσκαμπτα σύρματα. Το ένα άκρο κάθε σύρματος αγκυρώνεται εσωτερικά σε διάφορα βάθη. Ένα μηχανικό ωρολογιακό μικρόμετρο χρησιμοποιείται για να μετρά τη μετακίνηση έκαστου σύρματος σε σχέση με την κεφαλή ώστε να υπολογίζονται οι μέσες παραμορφώσεις του αγκυρίου στο μήκος του σύρματος. Οι διαστάσεις και το μέτρο ελαστικότητας του υλικού του αγκυρίου ελέγχονται με ακρίβεια στην παραγωγή, ώστε να υπολογίζονται οι τάσεις από τις μετρούμενες παραμορφώσεις. Η αντικατάσταση επιλεγμένων αγκυρίων της σταθεροποίησης του πετρώματος σε μία διατομή με μετρητικά, δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού διαγραμμάτων τάσεων των αγκυρίων γύρω από τη σήραγγα. Τέτοια μετρητικά αγκύρια έρχονται σε μήκη μέχρι και έξι μέτρα και με ονομαστικά φορτία μέχρι 250kN.

13.2.4 Αποκλισιόμετρα

Είναι όργανα μέτρησης της εγκάρσιας παραμόρφωσης γεώτρησης (Σχήμα 13-4). Η μέτρηση πραγματοποιείται συνήθως από βολίδα στην οποία βρίσκεται αισθητήρας βαρύτητας. Η τάση του εξερχόμενου ρεύματος μεταβάλλεται ανάλογα την κλίση της βολίδας από την κατακόρυφο. Η κλίση από την κατακόρυφο μετατρέπεται τριγωνομετρικά σε απόσταση από την κατακόρυφο για συγκεκριμένο μήκος.

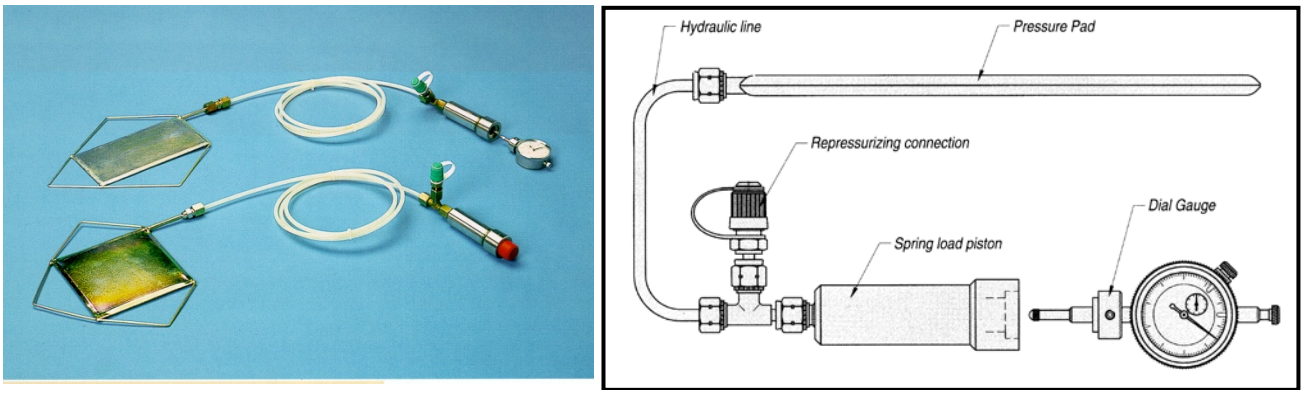


Σχήμα 13-4. Όργανα αποκλισιομέτρησης (SISGEO, 2001)

13.2.5 Κύτταρα πίεσης

Το κύτταρο (ή κυψέλη) υδραυλικής πίεσης αποτελείται από έναν επίπεδο γρύλο που συνδέεται με έναν υδραυλικό ή πνευματικό μορφοτροπέα διαφράγματος και στη συνέχεια μέσω εύκαμπτης σωλήνωσης με μια μονάδα ανάγνωσης (Σχήμα 13-5). Η ορθή τάση που μεταφέρεται από το περιβάλλον πέτρωμα ή σκυρόδεμα, μετρείται με την εξισορρόπηση της υδραυλικής πίεσης στο κύτταρο από μια πίεση που εφαρμόζεται στην άλλη πλευρά του διαφράγματος. Τα κύτταρα υδραυλικής πίεσης χρησιμοποιούνται για να μετρήσουν την ορθή τάση σε υλικά όπως επιχώματα, στις διεπαφές μεταξύ υλικών, π.χ. σε διεπαφή βράχου-σκυροδέματος, καθώς και μέσα στο σκυρόδεμα της επένδυσης για να μετρήσουν την αξονική και περιφερειακή τάση. Εάν απαιτούνται οι ενεργές τάσεις, πρέπει να εγκατασταθεί ένα πιεζόμετρο παράλληλα με το κύτταρο πίεσης. Οι διαδικασίες παρακολούθησης της ορθής τάσης με τα κύτταρα υδραυλικής πίεσης δίνονται από την επιτροπή τυποποίησης των εργαστηριακών και επί τόπου δοκιμών της ISRM (Brown, 1981).

Σε περίπτωση τοποθέτησης του γρύλου στο σκυρόδεμα, κατά τη σκλήρυνση αυτό συρρικνώνεται και μπορεί να αναπτυχθεί ένα κενό αέρα στις επιφάνειες του γρύλου. Γι΄ αυτό, συνδέεται με το γρύλο ένας σωλήνας αντιστάθμισης μέσω του οποίου εγχέεται ένας μικρός όγκος ρευστού, αμέσως μετά την εγκατάσταση, που διαστέλλει το γρύλο. Μια μικρή θετική πίεση αποκαθίσταται μέσα στο γρύλο, και όλες οι επόμενες αναγνώσεις πίεσης αναφέρονται σε αυτήν την αρχική τιμή.



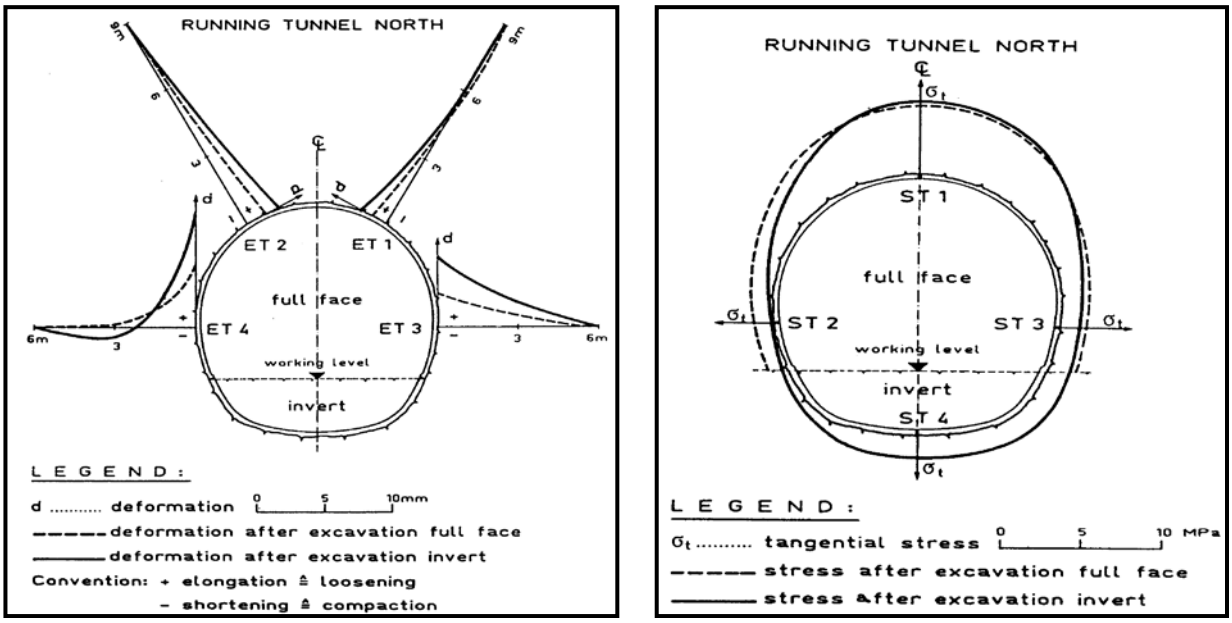
Σχήμα 13-5. Κυψέλες μέτρησης πίεσης (SISGEO, 2001)

Το ρευστό που χρησιμοποιείται για να γεμίσει το κύτταρο εξαρτάται από το υλικό στο οποίο εγκαθίσταται. Η συμπιεστότητα του κυττάρου πρέπει να είναι παρόμοια με αυτήν του περιβάλλοντος υλικού προκειμένου να δώσει το κύτταρο τη σωστή μέτρηση. Ένα κύτταρο που είναι πάρα πολύ δύσκαμπτο σχετικά με το περιβάλλον πέτρωμα θα καταγράψει μια υπερβολική πίεση, και κάποιο που είναι εύκαμπτο θα καταγράψει μια πίεση που είναι πολύ χαμηλή. Τα κύτταρα που εγκαθίστανται σε εδάφη πληρούνται συνήθως με υδραυλικό έλαιο και εκείνα που εγκαθίστανται σε βράχο ή σκυρόδεμα πληρούνται με υδράργυρο.

Η πίεση του ρευστού μετρείται με την εφαρμογή μιας πίεσης αέρα ή ελαίου σε ένα από τους δίδυμους σωλήνες που συνδέουν τον υδραυλικό μορφοτροπέα με τη μονάδα ανάγνωσης. Όταν αυτή η πίεση είναι επαρκής για να εξισορροπήσει την πίεση στο κύτταρο, καταγράφεται μια επιστροφή ροής αέρα ή ελαίου στη μονάδα ανάγνωσης. Η ορθή πίεση δίνεται από τη σχέση:

$$P = (P_r - P_i - P_h - P_f) \cdot E_p \tag{13-4}$$

όπου P_r=πίεση της ένδειξης, P_i=αρχική πίεση κυττάρου, P_h= διόρθωση πιεζομετρικού ύψους, P_f = διόρθωση για τις απώλειες τριβής, και E_p= παράγοντας πολλαπλασιασμού (μικρότερος από 1.0) για την αντιστάθμιση της επίδρασης των ακρών του κυττάρου.



Σχήμα 13-6. Αριστερά μετρήσεις επιμηκυνσιομέτρων σε τέσσερις θέσεις της περιμέτρου. σήραγγας. Δεξιά: Μετρήσεις της εφαπτομενικής τάσης στην επένδυση σήραγγας (ICE, 1990)

Παρόμοιοι γρύλοι χρησιμοποιούνται και για τη μέτρηση της παραμορφωσιμότητας της βραχομάζας (ASTM, 1986). Στο Σχήμα 13-6 αριστερά φαίνονται μετρήσεις παραμόρφωσης της περιβάλλουσας

βραχομάζας με επιμηκυνσιόμετρα διατρήματος δύο και τριών σημείων. Στο ίδιο σχήμα δεξιά φαίνονται μετρήσεις της εφαπτομενικής τάσης, σε κύτταρα πίεσης τοποθετημένα στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της άμεσης επένδυσης της ίδιας σήραγγας.

13.2.6 Μέτρηση της πίεσης σε γεώτρηση

Ο μετρητής τάσης (stressmeter) τοποθετείται σε γεώτρηση και μετρά τη μεταβολή της πίεσης σε μια κατεύθυνση μόνο. Συχνά λαμβάνονται τρεις μετρήσεις σε αμοιβαία κάθετες κατευθύνσεις, αλλά ακόμη και αυτές οι μετρήσεις δεν μπορούν να δώσουν την πλήρη μεταβολή του τανυστή της τάσης, εκτός αν οι τρεις κατευθύνσεις που επιλέγονται είναι κύριες. Επειδή η τιμή της τάσης προκύπτει από τη μετρούμενη παραμόρφωση, η αναμενόμενη ακρίβεια είναι αρκετά μικρότερη από αυτή των μετρήσεων μετατόπισης. Το όργανο αποτελείται από ένα κοίλο σώμα σκληρυμένου χάλυβα που προφορτίζεται διαμετρικά, έναντι των τοιχωμάτων μιας γεώτρησης διαμέτρου 38 mm, με τη βοήθεια ολισθαίνουσας σφήνας. Ο μετρητής τοποθετείται χρησιμοποιώντας ένα χειρωνακτικό ή υδραυλικό εργαλείο ρύθμισης που έλκει τη σφήνα εμπρός από το πλακίδιο και το σώμα του μετρητή και προφορτίζει την πλάκα στερέωσης και το μετρητή εντός του τοιχώματος της γεώτρησης.

Μεταβολές της τάσης του πετρώματος στη διεύθυνση προφόρτισης προκαλούν μικρές μεταβολές στη διάμετρο του κυλίνδρου μέτρησης. Αυτές οι αλλαγές μετρούνται από μετρητή δονούμενης χορδής. Οι μετρούμενες παραμορφώσεις μετατρέπονται σε μεταβολές της τάσης με βάση τις ελαστικές ιδιότητες του πετρώματος που θα πρέπει να είναι γνωστές. Η μέτρηση της μεταβολής της τάσης σε μια κατεύθυνση είναι επαρκής σε περιπτώσεις όπως σε στύλους, όπου η αύξηση στην αξονική ορθή τάση είναι πρωταρχικής σημασίας. Εφόσον απαιτείται η γνώση της μεταβολής της τάσης στο επίπεδο το κάθετο στον άξονα μιας γεώτρησης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τρεις μετρητές που κλίνουν μεταξύ τους 45°.

13.2.7 Πιεζόμετρα

Τα πιεζόμετρα (Σχήμα 13-7) είναι συσκευές μέτρησης της πίεσης του νερού των πόρων του εδάφους, αλλά και γενικότερα της πίεσης του νερού στη βραχομάζα. Διακρίνονται σε πιεζόμετρα κατακόρυφου σωλήνα, διαφράγματος, και υδραυλικά.

Τα πιεζόμετρα κατακόρυφου σωλήνα τοποθετούνται στο βάθος γεώτρησης και εγκιβωτίζονται μέσα σε άμμο. Διακρίνονται σε φρεάτια παρατήρησης και σε πιεζόμετρα Casagrande. Στα δεύτερα, η άμμος στεγανώνεται καλυπτόμενη από μπεντονίτη και τσιμεντένεμα.

Τα πιεζόμετρα διαφράγματος βασίζονται στην ύπαρξη ευλύγιστου διαφράγματος που έρχεται σε επαφή με το νερό του εδάφους. Όταν η πίεση που ασκεί το νερό στο διάφραγμα μεταβάλλεται το διάφραγμα μετακινείται. Η μέτρηση της πίεσης του νερού επιτυγχάνεται είτε με τη μέτρηση της πίεσης αντιστάθμισης πιεσμένου αέρα, είτε με τη μέτρηση της μετακίνησης του διαφράγματος από μετρητή δονούμενης χορδής ή ηλεκτρικής αντίστασης.

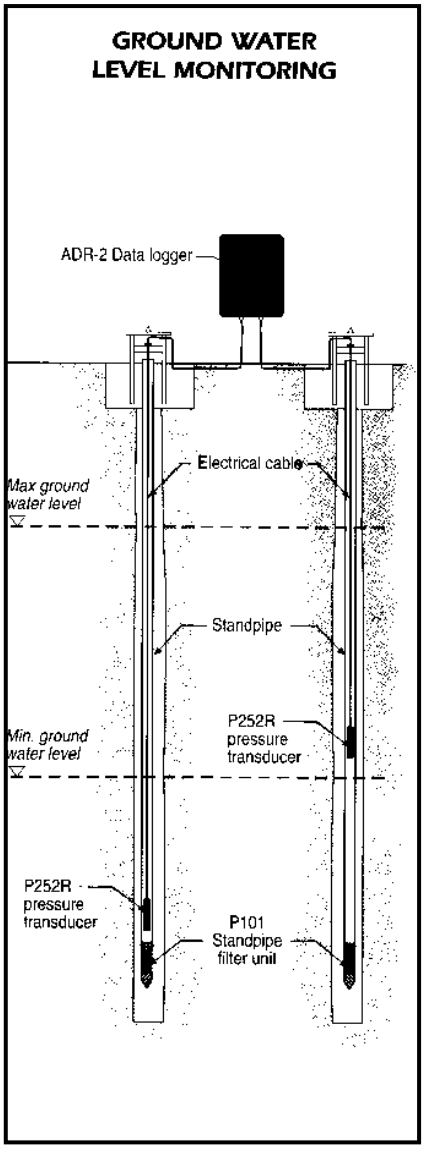
Τα υδραυλικά πιεζόμετρα αποτελούνται από σύστημα δύο πλαστικών σωλήνων απαερωμένου νερού και μετρητή πίεσης. Οι δύο σωλήνες στο βάθος της γεώτρησης εισέρχονται στο πιεζόμετρο που έχει κεραμικό φίλτρο. Η πίεση του νερού μετρείται από τους μετρητές πίεσης στην επιφάνεια.



(α) Πιεζόμετρο ανοικτού σωλήνα τύπου Casagrande



(β) Ηλεκτροπνευματικά όργανα και συσκευή ανάγνωσης



(γ) Τοποθετημένα πιεζόμετρα κατακόρυφου σωλήνα

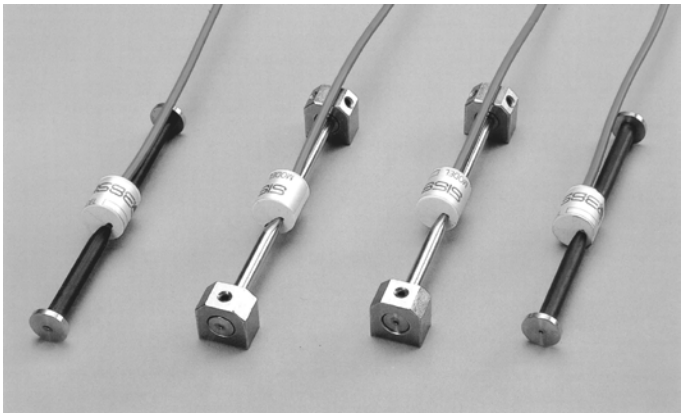
Σχήμα 13-7. Πιεζόμετρα (SISGEO, 2001)

13.2.8 Μετρητές φορτίου αγκυρίων

Αποτελούνται συνήθως από έναν κυλινδρικό δακτύλιο χάλυβα ή αλουμινίου (Σχήμα 13-8, αριστερά). Η μέτρηση επιτυγχάνεται είτε από ηλεκτρική αντίσταση είτε από δονούμενη χορδή. Επίσης, υπάρχουν μετρητές φορτίου υδραυλικού τύπου, στους οποίους η επιβαλλόμενη εξωτερική φόρτιση μετατρέπεται σε πίεση του υγρού που υπάρχει μέσα στο δακτύλιο.



(α) Ηλεκτρικά κελιά φορτίου αγκυρίων



(β) Μηκυνσιόμετρα δονούμενης χορδής

Σχήμα 13-8. Μετρητές φορτίου και παραμόρφωσης (SISGEO, 2001)

13.2.9 Εγκιβωτισμένοι μετρητές παραμόρφωσης

Χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση και παρακολούθηση της παραμόρφωσης στο οπλισμένο σκυρόδεμα ή στις επενδύσεις και υποστηρίξεις από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Οι μετρητές δύνανται να είναι ηλεκτρικής αντίστασης ή δονούμενης χορδής (Σχήμα 13-8, δεξιά). Υπάρχει ποικιλία μετρητών με ποικίλες διατάξεις τοποθέτησης ανάλογα με το αν πρόκειται να στερεωθούν στις ράβδους οπλισμού ή απλώς να εγκιβωτιστούν στο σκυρόδεμα. Οι μετρήσεις λαμβάνονται από εξωτερικές συσκευές ανάγνωσης που συνδέονται με τους μετρητές με καλώδια. Το εύρος μέτρησης των παραμορφώσεων είναι της τάξης των 3000μstrain, και το μήκος τους κυμαίνεται από 50 έως 250mm.

13.2.10 Ρωγμόμετρα

Μεταλλικός κανόνας (Σχήμα 13-9) προσδιορίζει την απόσταση δύο πύρων, ένα σε κάθε πλευρά μιας ρωγμής. Η μέτρηση μπορεί να γίνει με ηλεκτρικό όργανο μέτρησης. Τα όργανα μέτρησης μπορεί να είναι μετρητές χορδής ή ηλεκτρικής αντίστασης ή LVDT ή DCDT. Ο τριδιάστατος μετρητής μετρά τη μετακίνηση της ρωγμής σε τρεις διαστάσεις.



Σχήμα 13-9. Μηχανικοί μετρητές ρωγμών (SISGEO, 2001)

13.2.11 Μετρητές ακουστικής εκπομπής

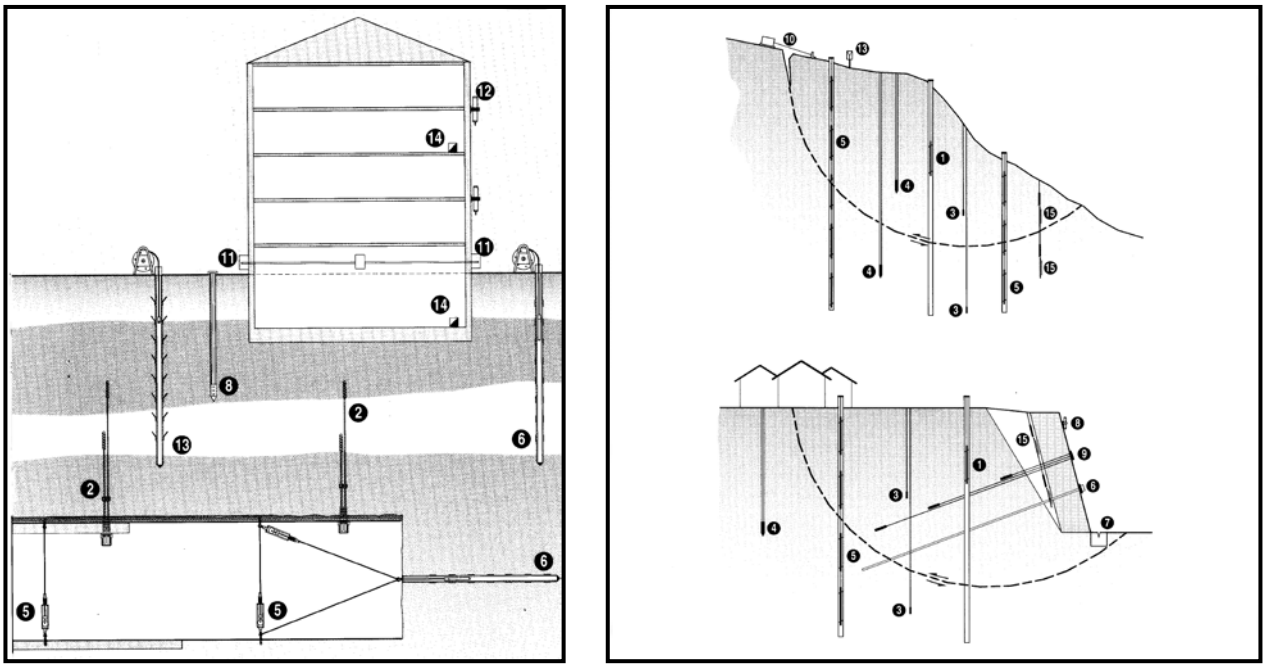
Εργαστηριακές και επί τόπου δοκιμές έχουν δείξει ότι του ευδιάκριτου θορύβου αστοχίας του πετρώματος, προηγούνται εκπομπές υποήχων. Η παρακολούθηση τέτοιων ακουστικών εκπομπών που προκαλούνται από την εξόρυξη αποτελεί ουσιαστικό μέρος της παρακολούθησης σε διάφορα μεταλλεία, ιδιαίτερα εκείνων που κινδυνεύουν από εκρήξεις του πετρώματος (rock burst). Οι συχνότητες του ακουστικού φάσματος των ηχητικών

κυμάτων είναι από 20 Hz έως 20 kHz. Η μικροσεισμική δραστηριότητα είναι χαμηλότερης συχνότητας. Οι συχνότητες των κυμάτων που εκπέμπονται από το πέτρωμα λόγω της εκμετάλλευσης κυμαίνονται από λιγότερο από 1 Hz σε περισσότερο από 10 kHz. Οι υψηλότερες συχνότητες, που καταγράφονται στις εργαστηριακές δοκιμές, τείνουν να μειωθούν γρήγορα με την αύξηση της απόστασης από την εστία. Η μικροσεισμική δραστηριότητα, δηλαδή οι εκπομπές χαμηλότερης συχνότητας, είναι οι σημαντικότερες στην υπόγεια εκμετάλλευση.

Η έρευνα έχει δείξει ότι τα πετρώματα κάτω από πίεση εκπέμπουν ανιχνεύσιμη σεισμική ενέργεια που αυξάνει με την αύξηση της πίεσης. Μια αύξηση στο ποσοστό εκπομπής γενικά προηγείται της θραύσης του πετρώματος. Η πηγή ενέργειας για ένα δεδομένο γεγονός μπορεί να βρεθεί χρησιμοποιώντας τριγωνισμό. Η μικροσεισμική δραστηριότητα ανιχνεύεται από γεώφωνο ή επιταχυνσιογράφο που μετατρέπει τη μηχανική δόνηση στο ηλεκτρικό ανάλογό της. Αυτό το ηλεκτρικό σήμα ενισχύεται έπειτα και διαβιβάζεται στο σταθμό παρακολούθησης. Τα γεώφωνα ή τα επιταχυνσιόμετρα τοποθετούνται είτε στα τοιχώματα των υπόγειων εκσκαφών είτε σε γεωτρήσεις από την επίγεια επιφάνεια.

13.3 Θέσεις τοποθέτησης

Προκειμένου να είναι δυνατή η αξιοποίηση και συσχέτιση των μετρήσεων, θα πρέπει να καταγράφεται η θέση τους και η χρονική στιγμή λήψης τους. Η τοποθέτηση των διαφόρων τύπων μετρήσεων στην ίδια διατομή και ει δυνατόν στα ίδια σημεία, επιτρέπει τη μεγαλύτερη δυνατή αξιοποίησή τους. Στο Σχήμα 13-10 αριστερά παρατηρούμε ένα ολοκληρωμένο σύστημα παρακολούθησης κατά τη διάνοιξη αβαθούς σήραγγας.. Στο ίδιο σχήμα δεξιά φαίνεται ένα σύστημα παρακολούθησης ευστάθειας πρανούς κάτω από το οποίο πρόκειται να διανοιχτεί σήραγγα.



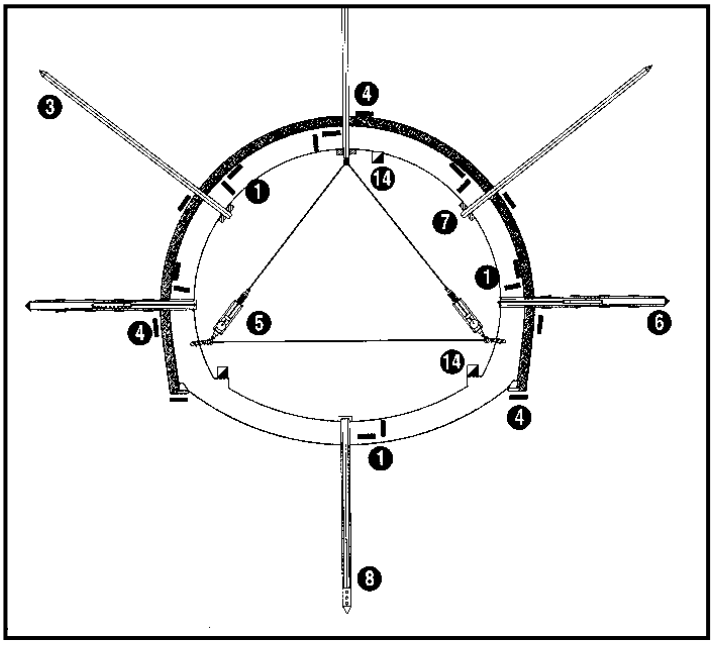
(α) Μετρήσεις κατά τη διάνοιξη αβαθούς σήραγγας 2 Επιμηκυνσιόμετρο διατρήματος, 5 Συγκλισιόμετρο, 6 Μετακινούμενο επιμηκυνσιόμετρο, 8 Στήλη μέτρησης στάθμης ύδατος και καθίζησης, 11 Σύστημα μέτρησης καθιζήσεων, 12 Κλινόμετρο επιφανείας, 13 Στήλη καθίζησης, 14 Σύστημα παρακολούθησης δονήσεων

(β) Μετρήσεις κατά τη διάνοιξη σήραγγας πλησίον πρανούς 1 Αποκλισιομετρικός σωλήνας, 3 Ηλεκτρικά πιεζόμετρα, 4 Πιεζόμετρα Casagrande, 5 Τοποθετημένα αποκλισιόμετρα, 6 Κυψέλες φορτίου αγκυρίων, 7 Μετρητές ροής, 8 Κλινόμετρα επιφανείας, 9 Επιμηκυνσιόμετρα διατρήματος, 10 Συρμάτινοι μετρητές ρωγμών, 13 Μετρητές βροχόπτωσης, 15 Υδραυλικές κυψέλες πίεσης

Σχήμα 13-10. Θέσεις τοποθέτησης μετρητών

Στο Σχήμα 13-11 αριστερά φαίνεται διατομή πολλαπλών μετρήσεων σήραγγας, ενώ δεξιά φαίνεται αυτοματοποιημένο σύστημα καταγραφής και παρακολούθησης πολλών διατομών μέτρησης. Η συνεχής

παρακολούθηση και η άμεση ενημέρωση των υπευθύνων απαιτεί την αυτοματοποιημένη λήψη των μετρήσεων με καταγραφικά δεδομένων και ψηφιακές οθόνες.

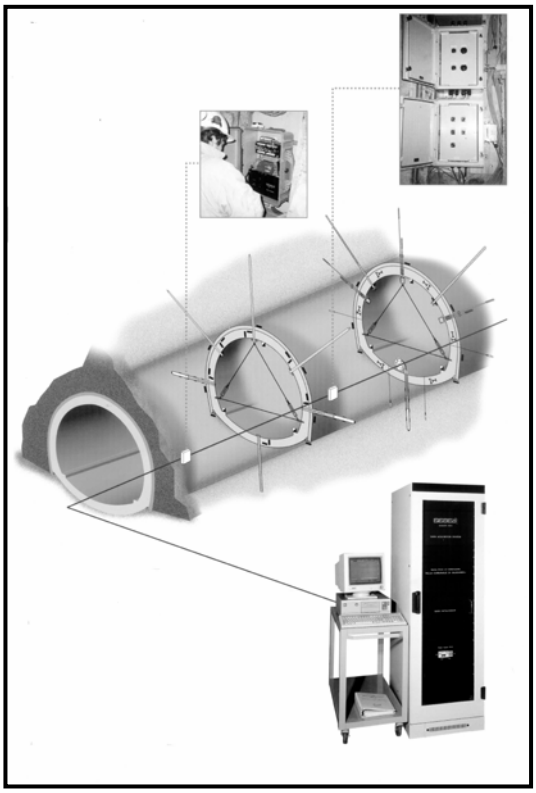


(α) Διατομή γεωτεχνικής παρακολούθησης σήραγγας
1 Κυψέλη μέτρησης πίεσης σκυροδέματος, 3 Μετρητικό αγκύριο, 4 Κυψέλη πίεσης, 5 Συγκλισιόμετρο, 6 Μετακινούμενο επιμηκυνσιόμετρο, 7 Κυψέλη φορτίου αγκυρίων, 8 Στήλη μέτρησης στάθμης ύδατος και καθίζησης, 14 Επιταχυνσιογράφος

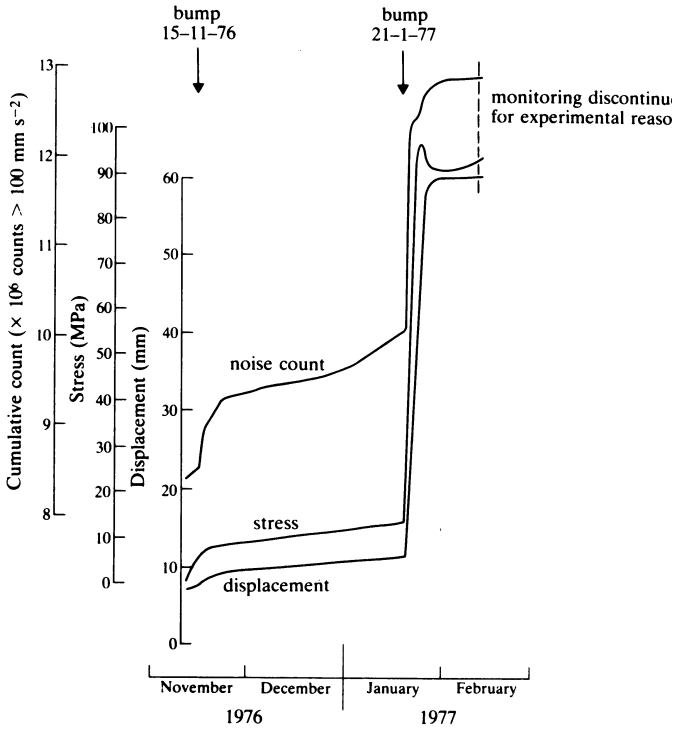


(β) Ψηφιακές οθόνες και καταγραφικό δεδομένων

Σχήμα 13-11. Διατομές γεωτεχνικής παρακολούθησης



(α) Συνεχής καταγραφή δεδομένων



(β) Συσχέτιση των μετρήσεων από διατομή γεωτεχνικής παρακολούθησης (Worotnicki et al., 1980).

Σχήμα 13-12. Λήψη και καταγραφή μετρήσεων

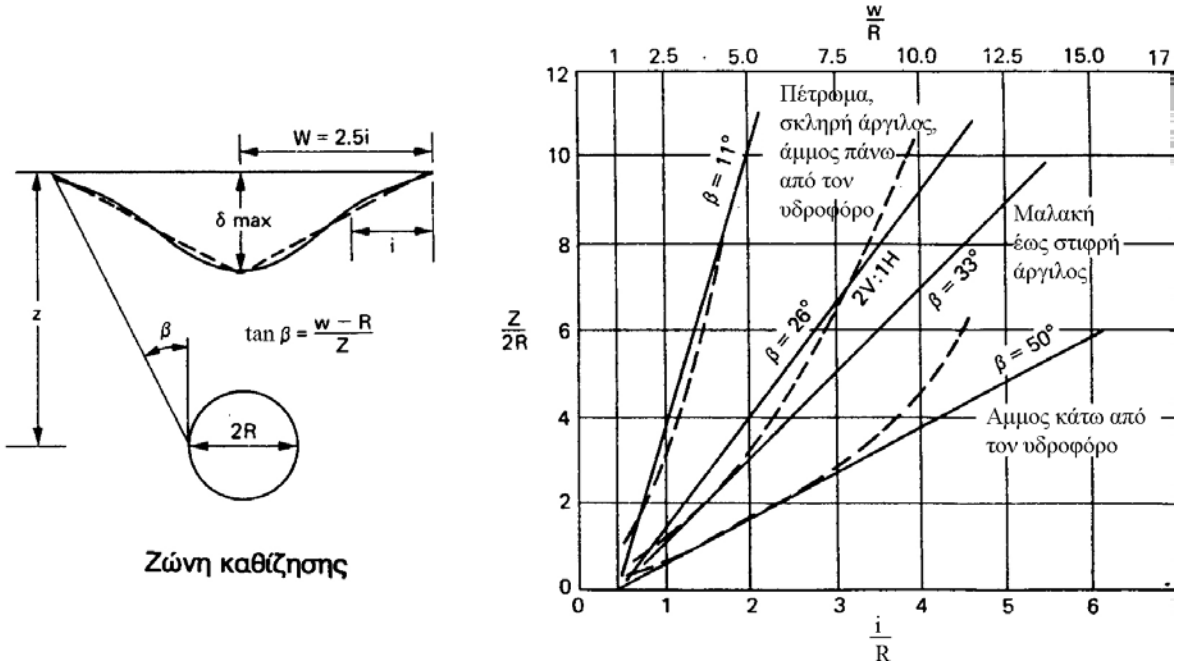
Στο Σχήμα 13-12α φαίνονται οι ψηφιακές οθόνες παρακολούθησης των μετρήσεων. Στο δεξιά σχήμα είναι σχεδιασμένες η εξέλιξη των μετατοπίσεων, των τάσεων και της σεισμικής δραστηριότητας με βάση τις καταγραφόμενες μετρήσεις από μία διατομή μέτρησης μιας σήραγγας.

13.4 Επίγειες καθιζήσεις λόγω διάνοιξης σηράγγων

Κατά τη διάνοιξη αστικών σηράγγων μετρό, ο μεγαλύτερος κίνδυνος συνίσταται στην εμφάνιση καθιζήσεων του εδάφους κάτω από τα επίγεια κτίσματα. Γι' αυτό, εφόσον είναι δυνατόν ακολουθείται χάραξη κάτω από δρόμους, ώστε οι όποιες καθιζήσεις να επηρεάζουν κατά το δυνατόν λιγότερο τα κτίσματα. Οι καθιζήσεις οφείλονται κυρίως σε δύο βασικούς παράγοντες: στη στερεοποίηση του εδάφους και στην απώλεια όγκου. Η στερεοποίηση του εδάφους οφείλεται γενικά στην ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα, ενώ η απώλεια όγκου οφείλεται στη μετατόπιση του εδάφους προς το υπόγειο άνοιγμα.

13.4.1 Απώλεια όγκου εδάφους

Απώλεια όγκου λόγω της διάνοιξης της σήραγγας ορίζεται ο όγκος εδάφους μεταξύ της τελικής θέσης της επιφάνειας εκσκαφής και της αρχικής θέσης της. Οφείλεται στην εκβολή του εδάφους στο μέτωπο της σήραγγας και την συνεπακόλουθη σύγκλιση έμπροσθεν του μετώπου, στο κενό που αφήνεται μεταξύ επιφάνειας όρυξης και επένδυσης της σήραγγας, και στην υποχώρηση της επένδυσης της σήραγγας. Η απώλεια όγκου ως ποσοστό V_L' του όγκου της σήραγγας, κυμαίνεται από 0.5% για πολύ καλό έλεγχο του εδάφους, έως και περισσότερο από 4% για πτωχής ποιότητας εργασία διάνοιξης.



Σχήμα 13-13. Εγκάρσια τομή καθιζήσεων στην επίγεια επιφάνεια (Peck, 1969)

13.4.2 Καθιζήσεις λόγω απώλειας όγκου εδάφους

Η απώλεια εδάφους στο επίπεδο της σήραγγας έχει σαν αποτέλεσμα την καθίζηση του εδάφους στην επιφάνεια. Αυτή εξαρτάται από τις ιδιότητες του εδάφους, τη μέθοδο κατασκευής και την ποιότητα της εργασίας. Ο καθιζάνον όγκος στην επιφάνεια θεωρείται ότι ισούται με την απώλεια όγκου στη σήραγγα, μολονότι στις μεν άμμους αυτός είναι μικρότερος λόγω διόγκωσης και στις αργίλους πιθανόν μεγαλύτερος λόγω στερεοποίησης.

Το σχήμα της καθίζησης s στην επιφάνεια (Σχήμα 13-13, αριστερά) μπορεί να προσομοιωθεί με τη συνάρτηση Gauss για την κανονική κατανομή πιθανότητας.

Αυτή ορίζεται από τη σχέση:

$$(\alpha)\ s_v = s_{v,max} \cdot e^{-\frac{x^2}{2 \cdot i^2}}$$
$$(\beta)\ V_s = \sqrt{2\pi} \cdot i \cdot s_{v,max} = 2.5 \cdot i \cdot s_{v,max}$$
$$(\gamma)\ s_{v,max} = \frac{V_s}{tan\,\beta \cdot z + R} = \frac{V_s}{2.5 \cdot i}$$
$$(\delta)\ tan\,\beta = \frac{2.5i - R}{z}$$
$$(\varepsilon)\ i = k \cdot z;\ k = \frac{tan\,\beta + \frac{R}{z}}{2.5}$$

(13-5)

όπου s_{vmax} η μέγιστη καθίζηση στο μέσον, x η απόσταση από το κέντρο, i η απόσταση του σημείου καμπής από το κέντρο, V_s ο όγκος καθίζησης που σε πρώτη προσέγγιση ισούται με την απώλεια όγκου, z το βάθος της εκσκαφής, R η ακτίνα της κυκλικής εκσκαφής και β η γωνία διάχυσης της απώλειας όγκου που εξαρτάται από τον τύπο του υπερκειμένου της εκσκαφής εδάφους (Σχήμα 13-13, δεξιά). Η μορφή των καμπυλών του σχήματος υποδεικνύει ότι κύριος παράγοντας που καθορίζει το εύρος της σκάφης των καθιζήσεων είναι το βάθος, ανεξάρτητα από τον τύπο του εδάφους. Οι Mair and Taylor (1997) λαμβάνουν αδρά υπόψη τον τύπο του εδάφους, προτείνοντας k=0.5 (tanβ≈45^o) για τα αργιλικά εδάφη και k=0.35 (tanβ≈32^o) για τα κοκκώδη εδάφη, ανεξάρτητα από τη στάθμη του υπόγειου νερού.

Οι οριζόντιες μετατοπίσεις σύμφωνα με τους Mair et al. (1996) ακολουθούν συμμετρική εκθετική κατανομή, και η μέγιστη τιμή τους συμβαίνει στη θέση του σημείου καμπής (x=i) των καθιζήσεων. Η μέγιστη τιμή δίνεται από τη σχέση:

$$s_{h,max} = 0.606 \cdot s_{v,max} \cdot \frac{\pm i}{z}\ (\approx 0.3 \cdot s_{v,max})$$

(13-6)

Οι καθιζήσεις έχουν ως αποτέλεσμα την απόκλιση της επίγειας επιφάνειας από την οριζόντια ή ομοίως της παρειάς του κτιρίου από την κατακόρυφο.. Η μέγιστη τιμή της απόκλισης αυτής συμβαίνει στο σημείο καμπής, και δίνεται από τη σχέση:

$$max\ s_v{}' = 0.607 \cdot \frac{s_{v,max}}{i}$$

(13-7)

13.4.3 Μέτρηση των μετατοπίσεων του εδάφους

Η επίγεια επιφάνεια μετατοπίζεται τόσον κατά την κατακόρυφη διεύθυνση όσον και κατά την οριζοντία. Η μέτρηση των κατακόρυφων μετατοπίσεων πραγματοποιείται κυρίως με χωροστάθμιση σημείων του εδάφους ή επί των κατασκευών. Οι οριζόντιες μετατοπίσεις μετρώνται κυρίως με τη βοήθεια κλισιμέτρων επί των κατασκευών.

13.4.4 Επικινδυνότητα καθιζήσεων

Ο έλεγχος της επικινδυνότητας των καθιζήσεων, σε πρώτο στάδιο, πραγματοποιείται για συνθήκες ελεύθερου πεδίου, δηλαδή αγνοείται η επίδραση, στις καθιζήσεις, της στιβαρότητας των κτιρίων. Γενικά, στροφή 1/500 και καθίζηση s_{max} 25mm, της θεμελίωσης των κτιρίων αποτελούν αποδεκτά άνω όρια σχετικών κανονισμών (π.χ. CEN, 2004), που εξασφαλίζουν ότι δεν θα συμβούν ρωγματώσεις στα κτίρια. Ο Πίνακας 13-1 και ο Πίνακας 13-2 δίνουν τα αποδεκτά όρια μετατοπίσεων σύμφωνα με τους πίνακες 13.1 και 13.2 του τεύχους Προδιαγραφών Μελετών Έργων Πολιτικού Μηχανικού της ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΑΕ.

Πίνακας 13-1. Οριακές τιμές μετατοπίσεων για ευαίσθητο κτήριο ή κατασκευή (1)

α/α	Καθίζηση, παραμόρφωση, ρωγμάτωση, κλπ.	Όριο επιφυλακής	Όριο συναγερμού
1	**Ολική καθίζηση**	15 mm	20 mm
2	**Γωνιακή παραμόρφωση**	1/1200 (=0.83mm/m)	1/800 (=1.25mm/m)
3	**Ρυθμός μεταβολής ολικής καθίζησης (2)**	2.0 mm/ημέρα	3.0 mm/ημέρα
4	**Ρυθμός μεταβολής ανοίγματος ρωγμής (2)**	0.5 mm/ημέρα	1.0 mm/ημέρα
5	**Οριζόντια παραμόρφωση (3)**	0.10 %	0.15 %

Πίνακας 13-2. Οριακές τιμές μετατοπίσεων για άλλο κτίριο, δρόμο, πεζοδρόμιο, δίκτυα ΟΚΩ

α/α	Καθίζηση, παραμόρφωση, ρωγμάτωση, κλπ.	Όριο επιφυλακής	Όριο συναγερμού
1	**Ολική καθίζηση**	20 mm	20 mm
2	**Γωνιακή παραμόρφωση**	1/800 (=1.25mm/m)	1/800 (=1.25mm/m)
3	**Ρυθμός μεταβολής ολικής καθίζησης (2)**	3.0 mm/ημέρα	4.0 mm/ημέρα
4	**Ρυθμός μεταβολής ανοίγματος ρωγμής (2)**	0.5 mm/ημέρα	1.0 mm/ημέρα
5	**Οριζόντια παραμόρφωση (3)**	0.20 %	0.30 %

(1) Οποιοδήποτε κτίριο ή κατασκευή από τοιχοποιία, αργολιθοδομή ή παρόμοια δομή, μνημείο ή αρχαιότητα, ήδη βλαμμένα ή τρωτά κτίρια, αποχετευτικά συστήματα μεγάλης διατομής, γέφυρες, κ.α.

(2) Ρυθμός μεταβολής για περισσότερες από δύο ή τρεις μέρες.

(3) Ειδικότερα για θεμελιώσεις κτιρίων που γειτνιάζουν με βαθιές εκσκαφές και ανοικτά ορύγματα.

Βιβλιογραφία

ASTM (1986). Standards relating to natural building stones, soil and Rock; Geotextiles.

Brady BHG & Brown ET (1985). Rock Mechanics for Underground Mining, George Allen & Unwin Ltd.

Brown ET (1981). Rock Characterization Testing and Monitoring, ISRM Suggested Methods. Pergamon Press

CEN (2004). "Eurocode 7 Geotechnical design – Part 1: General rules", (EN 1997 – 1: 2004).

Γεωργιάνου ΒΝ (2000). Χρήση Γεωτεχνικών οργάνων – Οργανομετρήσεις, Παρισιάνος.

Dunnicliff John (1990). Geotechnical Instrumentation for monitoring fiel performance. Wiley Interscience.

Hanna TH (1985). Field Instrumentation in Geotechnical Engineering, Trans Tech Publications.

ICE (1990). Geotechnical Instrumentation in practice. Purpose, performance and interpretation. Thomas Telford, London.

Peck RB (1969). Deep excavations and tunneling in soft ground", State of the Art Volume, 7th International Conf., Soil Mech. And Found., Mexico City.

SISGEO (2001). Geotechnical Instrumentation Manufacturing Company. Product Manual.

Worotnicki G, Enever JR, McKavanagh B, Spathis A and Walton R (1980). Experience with the monitoring of crown pillar performance in two Australian Mines. Proc. 3rd Aust. – NZ conf. Geomech. Wellington, 2, 161-8, Wellington: NZ Inst. Engnrs.

Κριτήρια αξιολόγησης

Κριτήριο αξιολόγησης 1

Σήραγγα του μετρό της Αθήνας, διαμέτρου εκσκαφής D=9.48m διανοίγεται σε βάθος H=14m. Η σταθερά k=0.35 και η απώλεια όγκου εδάφους V_L΄=0.8%.

α. Να υπολογιστούν: η απόσταση i της θέσης του σημείου καμπής, η μέγιστη καθίζηση s_{max}, η μέγιστη οριζόντια μετατόπιση s_{hmax}, και η μέγιστη απόκλιση max s_v΄ από την κατακόρυφο.

β. Να ελεγχθούν ως προς τα αποδεκτά όρια μετατοπίσεων για κοινά κτήρια.

Απάντηση/Λύση

$$z = H + \frac{D}{2} = 14 + \frac{9.48}{2} = 18.74m$$

(Σχήμα 13-13)

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 70.58m^2;\ V_s = 0.008 \cdot A = 0.565m^3/m$$

$$i = k \cdot z = 0.35 \cdot 18.74 = 6.56m$$

(13-5)ε

$$s_{v,max} = \frac{V_s}{2.5 \cdot i} = \frac{0.565}{2.5 \cdot 6.56} \cdot 1000 = 34.44mm > 20mm$$

(13-5)γ

$$s_{h,max} = 0.606 \cdot s_{v,max} \cdot \frac{\pm i}{z} = 0.606 \cdot 34.44 \cdot \frac{\pm 6.56}{18.74} = \pm 7.31mm$$

(13-6)

$$\max s_v{}' = 0.607 \cdot \frac{s_{v,max}}{i} = 3.18\frac{mm}{m} = \frac{1}{315} > 1.25\frac{mm}{m}$$

(13-7)

Κριτήριο αξιολόγησης 2

Λαμβάνοντας υπόψη ότι, η διάνοιξη της σήραγγας Ανθοχωρίου (Άσκηση κεφαλαίου 5) γίνεται σε δύο φάσεις, να επιλεγούν τα κατάλληλα όργανα παρακολούθησης και να δοθούν πιθανά διαγράμματα αναγνώσεων για τη μέτρηση:

1. **Των συγκλίσεων των παρειών και της οροφής της σήραγγας.**
2. **Των παραμορφώσεων μέσα στο περιβάλλον πέτρωμα.**
3. **Της πίεσης του πετρώματος στην επένδυση.**
4. **Της θλιπτικής τάσης εντός της επένδυσης.**
5. **Της πίεσης του νερού στην επένδυση.**

Επιπλέον να γίνει σύντομη περιγραφή της λειτουργίας των οργάνων που επιλέχθηκαν και να σχεδιαστούν οι τυπικές διατομές τοποθέτησης των οργάνων παρακολούθησης.

Απάντηση/Λύση

Κεφάλαιο 14

Σύνοψη
Το παράρτημα περιέχει συνήθεις όρους που χρησιμοποιούνται στα κείμενα διάνοιξης σηράγγων, καθώς και σχετικό συνοπτικό λεξικό σε τέσσερεις γλώσσες.

Χρήσιμη Βιβλιογραφία: *Εξάγλωσσο λεξικό γεωτεχνικών και μεταλλευτικών όρων, ΤΕΕ 1993.*

14. Παράρτημα

14.1 Όροι που χρησιμοποιούνται στα κείμενα της σηραγγοποιίας

Ανάντη (*upstream*). Π.χ. ανάντη του φράγματος, δηλ. στο χώρο του ταμιευτήρα ή και πριν από αυτόν.

Αισθητική εμφάνιση (*aesthetic appearance*): Η εξασφάλισή της απαιτεί την αποφυγή εμφανών ρωγματώσεων, διατήρηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών, του χρώματος, κλπ.

Ανάστροφο (*τόξο πυθμένα*) (Invert): Η περιοχή εκσκαφής του πυθμένα κάτω από την βαθμίδα (εφόσον υπάρχει τέτοια), αλλά και ο φορέας στήριξης της γεωμάζας στην περιοχή αυτή.

Ανθεκτικότητα (*durability*): Ονομάζουμε την ικανότητα της κατασκευής να ανθίσταται στις περιβαλλοντικές (φυσικές και χημικές) επιδράσεις χωρίς να χάνει τις ιδιότητες αντοχής και λειτουργίας κάτω ενός ανεκτού ορίου.

Αντιπροσωπευτική τιμή (*representative value*): Περιλαμβάνει τη χαρακτηριστική και την ονομαστική τιμή.

Ανύψωση (*heave*): Κατακόρυφη προς τα πάνω μετακίνηση του εδάφους στην περιοχή του ανάστροφου.

Αποφλοίωση (*spalling*): Θραύση του ψαθυρού υλικού σε επιφάνειες παράλληλες προς την ελεύθερη επιφάνεια με εν συνεχεία αποχωρισμό των θραυσμάτων.

Αρχική ή άμεση υποστήριξη (*primary support*): Η υποστήριξη της διατομής της σήραγγας που τοποθετείται για να εξασφαλίσει τη διατήρηση του ανοίγματος και να παρέχει ασφάλεια στη διάνοιξη μέχρι να τοποθετηθεί η τελική επένδυση. Αποτελείται συνήθως από εκτοξευμένο σκυρόδεμα, ηλώσεις και χαλύβδινα πλαίσια.

Άσκαφτος πυρήνας (βλ. ήβωμα) (*dumpling*): Γεωμάζα του μετώπου που παραμένει για να προσφέρει προσωρινή αντιστήριξη σε αυτό.

Βαθμίδα (*bench*): Η ενδιάμεση διατομή /ές μεταξύ της άνω ημιδιατομής και του ανάστροφου κατά την εκσκαφή μιας σήραγγας σε οριζόντια κλιμακωτά στάδια.

Βελτίωση γεωμάζας (*ground improvement*): Διαδικασία που αποβλέπει στη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων της γεωμάζας. Παραδείγματα αποτελούν η ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα, η ψύξη και ο εμποτισμός με ένεμα του εδάφους, κα.

Βήμα (προχώρησης) (*step, round*): Το μήκος προχώρησης της διάνοιξης, είτε για κάθε τμηματικό μέτωπο είτε για ολόκληρη τη διατομή.

Βραχομάζα (*rock mass*): Φυσικό υλικό μέσα στο οποίο εκσκάπτεται η σήραγγα, το οποίο συνίσταται από πετρώματα τα οποία δύνανται να είναι συμπαγή, κερματισμένα ή και αποσαθρωμένα.

Βράχος (*rock*): Φυσικό υλικό μέσα στο οποίο εκσκάπτεται η σήραγγα, το οποίο σε αντίθεση με το έδαφος έχει μεγάλη συνεκτικότητα και σκληρότητα, και γι' αυτό δεν εκσκάπτεται με συνήθη μηχανικά μέσα.

Γεωμάζα (*ground*): Κάθε φυσικό υλικό μέσα στο οποίο εκσκάπτεται η σήραγγα. Σαν όρος περιέχει το έδαφος και το βράχο.

Διαστασιολόγηση υποστήριξης (*design of support*): Αναφέρεται στα μέτρα άμεσης υποστήριξης και τελικής επένδυσης.

Διευρυμένο πέλμα (*elephant's foot*): Διευρυμένη επιφάνεια έδρασης της επένδυσης, συνήθως, της άνω ημιδιατομής.

Δικτυωτό πλαίσιο (*Lattice girder*): Πλαίσιο κατασκευασμένο από συγκολλημένες ράβδους χάλυβα. Συνήθως έρχεται στο εργοτάξιο σε τμήματα τα οποία συναρμολογούνται επιτόπου. Τα τμήματα έχουν στα άκρα τους πλάκες, και συνδέονται μεταξύ τους με κοχλίες και περικόχλια.

Έδαφος (*soil*): Φυσικό υλικό μέσα στο οποίο εκσκάπτεται η σήραγγα, το οποίο σε αντίθεση με το βράχο έχει μικρή συνεκτικότητα και γι' αυτό εκσκάπτεται εύκολα με συνήθη μηχανικά μέσα.

Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (*shotcrete*): Σκυρόδεμα που περιέχει πρόσμικτα και εκτοξεύεται με πίεση από ακροφύσιο σε επιφάνεια.

Ενέσεις αντιστάθμισης (*compensation grouting*): Σύστημα με το οποίο ένεμα εισπιέζεται στη γεωμάζα πάνω από τη σήραγγα και κάτω από επιφανειακές κατασκευές. Σκοπός του είναι να μειώσει τα αποτελέσματα των επιφανειακών καθιζήσεων που προκλήθηκαν από απώλεια γεωμάζας λόγω της διάνοιξης της σήραγγας.

Εξωράχειο (*extrados*): Το εξωτερικό περίγραμμα της επένδυσης (αρχικής ή τελικής) της σήραγγας.

Εσωράχειο (*intrados*): Το εσωτερικό περίγραμμα της επένδυσης (αρχικής ή τελικής) της σήραγγας.

Επιτελεστικότητα (*performance*): Είναι η ταυτόχρονη εκπλήρωση των απαιτήσεων ασφάλειας, λειτουργικότητας, και αισθητικής εμφάνισης μιας κατασκευής.

Ήλοι (ή αγκύρια) (*bolts*): Μεταλλικές (γενικά) ράβδοι που τοποθετούνται στο πέτρωμα.

Καθίζηση (*settlement*): Η βύθιση της επιφάνειας του εδάφους πάνω από τη σήραγγα, που οφείλεται στην υπόγεια εκσκαφή. Ενίοτε χρησιμοποιείται και για τη βύθιση της θεμελίωσης του κελύφους της άμεσης υποστήριξης.

Κατάντη (*downstream*): Π.χ. Κατάντη του φράγματος, δηλ. στο χώρο μετά τον ταμιευτήρα.

Κατάρρευση ως την επιφάνεια (*daylight collapse*): Κατάρρευση που εκτείνεται μέχρι την επιφάνεια. Ονομάζεται στην πράξη και καμινάδα (*chimney*).

Κινηματική αστοχία (*kinematic failure*): Αστοχία του μετώπου, της οροφής ή των παρειών, χαρακτηριζόμενη από την αποσύνδεση τεμάχους βράχου πάνω σε ασυνέχειες, και πτώση ή ολίσθησή του λόγω βαρύτητας.

Κλείσιμο δακτυλίου (*Ring closure*): Η πραγματοποίηση του κλεισίματος της επένδυσης της σήραγγας, ώστε αυτή να πάρει σχήμα δακτυλίου.

Κοπή και επικάλυψη (*cut and cover*): Σύστημα κατασκευής σήραγγας με ανοικτή εκσκαφή σε αντίθεση αυτού της εκσκαφής με υπόγεια όρυξη (διάτρηση).

Κύκλος (*round*): Η πλήρης σειρά εργασιών διάνοιξης, είτε για κάθε τμηματικό μέτωπο είτε για ολόκληρη τη διατομή.

Λειτουργική διάρκεια ζωής (*Functional service life*): Είναι ο χρόνος μετά από τον οποίο η κατασκευή καθίσταται λειτουργικά άχρηστη επειδή άλλαξαν οι απαιτήσεις μας. Η λειτουργική διάρκεια ζωής καθορίζεται από πολιτικούς, κοινωνικούς και ιστορικούς παράγοντες και όχι από οικονομικούς ή επιστημονικούς.

Λειτουργικότητα (*serviceability*): Είναι η ικανοποίηση των σκοπών λειτουργίας της κατασκευής, π.χ. περιορισμός των παραμορφώσεων, στεγανότητα, περιορισμός κραδασμών, κλπ.

Μελετητικό σχήμα (*design scheme*): Σύμπραξη ή κοινοπραξία γραφείων μελετών διαφόρων κατηγοριών μελέτης που συνεργάζονται για την εκπόνηση σύνθετης μελέτης.

Οικονομική διάρκεια ζωής (*Economical service life*): Είναι ο χρόνος κατά τον οποίο η κατασκευή μας εξυπηρετεί μέχρι να εκτιμηθεί ότι η αντικατάστασή της είναι οικονομικά περισσότερο συμφέρουσα από ότι η διατήρηση σε λειτουργία με συνεχείς συντηρήσεις, επισκευές ή αλλαγή χρήσης.

Παρακολούθηση (*monitoring*): Πρόκειται για μέθοδο που περιέχει ενόργανες μετρήσεις και απευθείας οπτικές παρατηρήσεις με σκοπό τον έλεγχο της συμπεριφοράς της υποστήριξης και της περιβάλλουσας γεωμάζας.

Παραμόρφωση (*deformation*): Είναι η μεταβολή του σχήματος μιας κατασκευής ή του εδάφους.

Πέτρωμα (*rock*): Στα τεχνικά έργα ο όρος ταυτίζεται με το βράχο.

Σήραγγα οδηγός (*pilot tunnel*): Σήραγγα μικρότερης διαμέτρου, που συχνά είναι ερευνητικού χαρακτήρα, που διανοίγεται μπροστά από το κύριο μέτωπο της σήραγγας.

Στέψη ή κλείδα (*crown*): Το ανώτατο τμήμα του περιγράμματος μιας σήραγγας.

Στοά (*drift, gallery*): Σήραγγα μικρής διαμέτρου που δύναται να αποτελεί μέρος μεγαλύτερης σήραγγας. Επίσης, μικρής διαμέτρου σήραγγα με ένα μόνο στόμιο.

Στόμιο (Πύλη) (*Portal*): Μία είσοδος ή έξοδος της σήραγγας.

Σύγκλιση (*convergence*): Μεταβολή της απόστασης μεταξύ σημείων της διατομής μιας σήραγγας.

Τελική επένδυση (*final lining*): Το δομικό σύστημα που έχει σκοπό τη διασφάλιση της επιτελεστικότητας της σήραγγας για την τεχνική διάρκεια ζωής της.

Τεχνική διάρκεια ζωής (*design life*): Είναι ο χρόνος κατά τον οποίο η κατασκευή εκπληρώνει όλες τις απαιτήσεις επιτελεστικότητας.

Τεχνικογεωλογική ενότητα (*geotechnical entity*): Ομάδα ή ενότητα γεωμαζών με παρόμοια τεχνικά χαρακτηριστικά.

Ύβωμα (*dumpling*): Κεντρικός πυρήνας από άσκαφτη γεωμάζα που προσφέρει προσωρινή υποστήριξη στο μέτωπο.

Φθορά (*damage*): Είναι κάθε απώλεια επιτελεστικότητας μέσα στον χρόνο.

Χαρακτηριστική τιμή (ιδιότητας υλικού) (*characteristic material value*): Η τιμή μιας ιδιότητας υλικού που έχει μια προδιαγραμμένη πιθανότητα μη επίτευξής της κατά την υποθετική εκτέλεση απεριορίστων σειρών δοκιμών. Αυτή η τιμή γενικώς αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο ποσοστημόριο της στατιστικής κατανομής της συγκεκριμένης ιδιότητας του υλικού που έχει υποτεθεί. Σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιείται μία ονομαστική τιμή.

Χαρακτηριστική τιμή μιας δράσης (*characteristic action value*): Η κύρια αντιπροσωπευτική τιμή μιας δράσης. Στο μέτρο που αυτή η χαρακτηριστική τιμή μπορεί να καθοριστεί πάνω σε στατιστικές βάσεις, επιλέγεται έτσι ώστε να αντιστοιχεί σε μία προδιαγεγραμμένη πιθανότητα μη υπέρβασής της προς τη δυσμενή πλευρά κατά τη διάρκεια μιας περιόδου αναφοράς, λαμβάνοντας υπόψη τη διάρκεια ζωής σχεδιασμού του δομήματος.

Χρόνος ευστάθειας (*stand up time*): Ο χρόνος κατά τον οποίο ένα ανυποστήρικτο εκσκαμμένο μέτωπο παραμένει ευσταθές. Χρησιμοποιείται επίσης ο όρος «Χρόνος αυτο(υπο)στήριξης».

14.2 Συνοπτικό Λεξικό

Ελληνικά	Αγγλικά	Γερμανικά	Γαλλικά
αβαθής	shallow	seicht	peu profond
αγωγός εξαερισμού	evase stack		
ανυποστήρικτο	unsupported	ungesichert	sans soutenement
άνω ημιδιατομή (προπορείας)	top heading	Kalotte, Firststrecke	avancement de pointe
αποκομιδή	mucking	aufladen	chargement
απότομη απώλεια πίεσης, κλατάρισμα	blow out	ausblasen	faire canon
αρχή εκσκαφής	excavation start	Ansteckpunkt	
ασπίδα	shield	Schild	blindage
αψίδα, θόλος	arch	Gewolbe	arche
βαθμίδα	bench	Strosse	gradin
βράχος, πέτρωμα	rock	Fels, Gestein	roche
βυθίζω, καταδύω	submerge, sink	versenken	submerger
δάπεδο	floor	Sohle	sole
διατρώ, διατρυπώ	bore	Bohrung	forage
διάφραγμα	bulkhead	Scheidewand	cloison
διερευνητική στοά	pilot Tunnel, pioneer bore	Richtstollen	galerie pilote
διευθυντική στοά	drift	Drift	galerie en direction
εγκάρσια στοά	adit	Zugangstollen	fendue
εκτοξευόμενο σκυρόδεμα	shotcrete	Spritzmortel	beton projecter
επένδυση	lining	Verkleidung	cuvelage
ήλος, κοχλίας	bolt	Bolzen	boulon
θάλαμος	cavern	Kaverne, Halle	caverne
θάλαμος εξισορρόπησης	air lock		
κοπή και επίχωση	cut and cover		
καταβύθιση	subsidence		
λίθος	stone	Stein	pierre, caillou
μαλακό έδαφος	soft ground	weicher Grund	terrain mou
μέτωπο	face	Brust, Stoss	face, taille
μικτό	mixed		
ξεσκάρωμα	scaling	Verzunderung	reglage, ecaillage
ξηρή γόμωση	dry packing	Versetzen	remblayage
οδός	highway	Strasse	Route
όρος - βουνό	mountain	Berg	montagne
παράθυρο	window	Fenster	fenetre
παρειά	side wall	Ulmen	paroi laterale
παρέμβυσμα στεγάνωσης οπής κοχλιών	grommet		
περίβλημα (πλαισίων)	lagging	Umkleidung	garnissage
πλαίσια	sets, frames	Rahmen	cadre
προόρυγμα	portal cut	Voreinschnitt	
πυρήνας	core	Kern	noyau
ράβδοι προπορείας	spiling		
σανίδες μετώπου	breast boards	Brettershild	bouclier
σανίδες προϋποστήριξης άνω των πλαισίων	poling boards,	Abpfandung, Vortreibepfahl-zimmerung	poussage, enfilage
σήραγγα	tunnel	Tunnel	tunnel
σήραγγα μετρό	rapid transit tunnel	U-bahn tunnel	Metro tunnel
σιδηρόδρομος	railroad, railway	Eisenbahn	chemin de fer
στέψη	crown	Firste	couronne
στοά	gallery	Stollen	galerie
στοά προπορείας, προσπέλασης	heading	Richtstrecke	avancement

στόμιο – πύλη	portal	Portal, Mundloch	entree
σωλήνα σκυροδέτησης της επένδυσης	slick line		
τάφρος	trench	Graben	tranchee, ravin
υδαταγωγός	aqueduct	Wasserleitung	aqueduc
υπερκείμενο	overburden	Uberlagerung	terrain de recouvrement
υποβρύχιος	underwater, subaqueous	tauchend	
υπόνομος	sewer	Abwasserung	egout
υποστήριξη	support	Sicherung	soutenement
φορείο	jumbo	Bohrwagen	jumbo
φρέαρ	shaft	Schacht	puits
φωτεινή ακτίνα	laser	Laser	laser
χαλύβδινη πλάκα επένδυσης	liner plate	Einlageplatte	chemise