

Η ΣΗΡΑΓΓΑ ΕΥΗΝΟΥ – ΜΟΡΝΟΥ

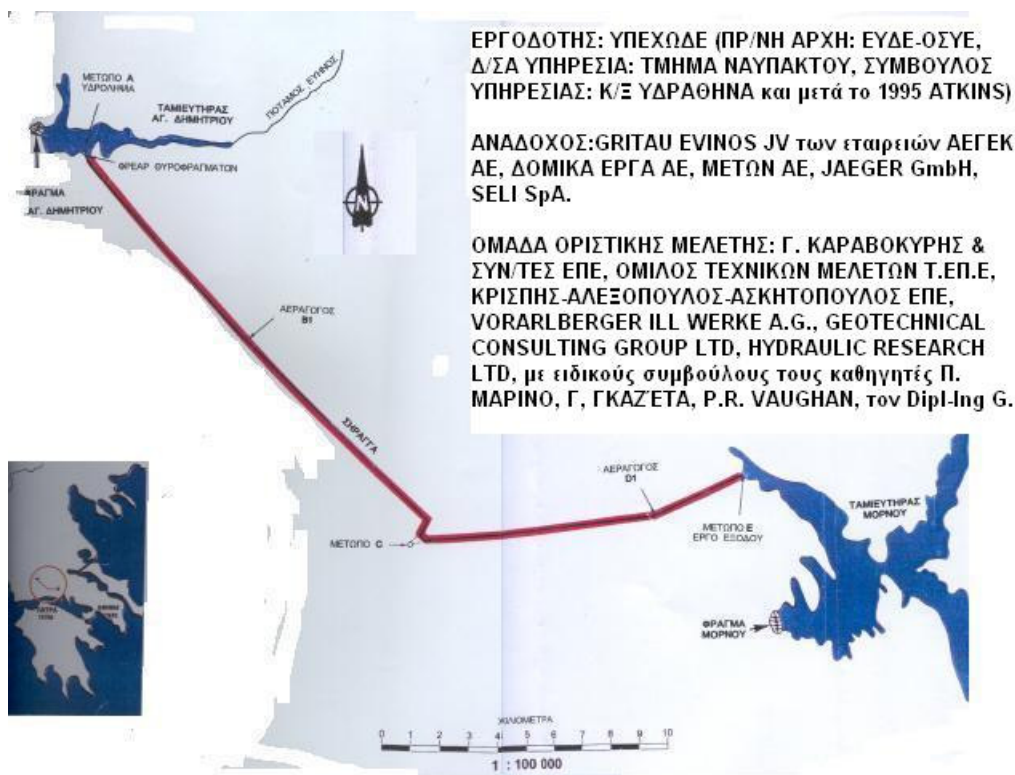
Γιάννης Μπακογιάννης Μετ. Μηχανικός στο Τμήμα Πατρών της ΕΥΔΕ/ΟΣΥΕ

Δημήτρης Νικολάου Πολ. Μηχ. Γενικός Διευθυντής Συγκοινωνιακών Έργων ΥΠΕΧΩΔΕ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η 1η φάση του σύγχρονου συστήματος υδροδότησης της μείζονος περιοχής της πρωτεύουσας σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του '80, με βασικό ταμιευτήρα αυτόν του ποταμού Μόρνου και υδραγωγείο βαρύτητας μήκους 186χλμ. Η 2η φάση προέβλεπε την ενίσχυση του βασικού αυτού ταμιευτήρα με τα νερά της παρακείμενης λεκάνης του ποταμού Ευήνου και υλοποιήθηκε με μια σειρά έργων η κατασκευή των οποίων διήρκεσε από το 1992 μέχρι και το 2002.

Το κυρίως έργο Ευήνου αποτελείται από το φράγμα Αγίου Δημητρίου με το οποίο δημιουργήθηκε ο αντίστοιχος ταμιευτήρας και την σήραγγα Ευήνου Μόρνου με την οποία, από τα αποθέματα του ταμιευτήρα αυτού, διοχετεύεται προς τον ταμιευτήρα του Μόρνου μία ποσότητα περίπου $2,5 \cdot 10^8 \text{ m}^3$ ανά έτος. Στο Σχ.1 παρουσιάζεται η γενική διάταξη των έργων και οι συντελεστές αυτών.



Σχήμα 1: Γενική διάταξη έργων Ευήνου και οι συντελεστές αυτών.

1.1. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΧΑΡΑΞΗΣ ΚΑΙ ΥΔΡΑΥΛΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

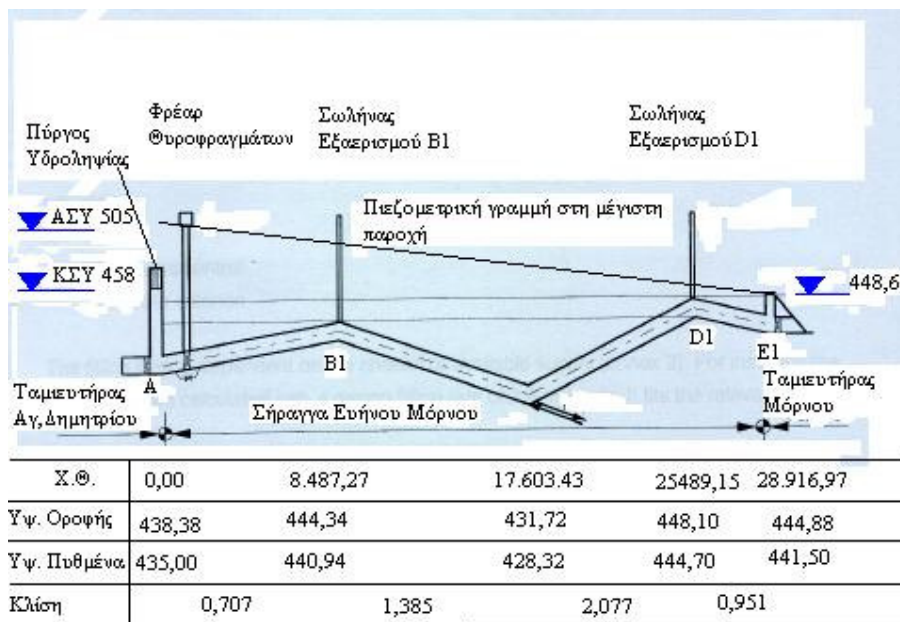
Για την οριστικοποίηση της χάραξης της σήραγγας ελήφθησαν υπόψη τα παρακάτω:

- ✓ Οι σχεδόν δεσμευτικές θέσεις των έργων εισόδου και εξόδου.
- ✓ Οι ιδιαίτερα αυστηρές χρονικές απαιτήσεις για την παράδοση του έργου.

- ✓ Οι προβλεπόμενες γεωλογικές συνθήκες
- ✓ Οι επιλεγείσες μέθοδοι και εξοπλισμός διάτρησης της σήραγγας και ειδικότερα η απαίτηση για “ανερχόμενη” πορεία του TBM, για διευκόλυνση της διαχείρισης των αναμενόμενων υδατικών εισροών.
- ✓ Η διαχείριση της αβεβαιότητας σε μία μεγάλου μήκους και βάθους σήραγγα.

Με τον καθορισμό του ενδιαμέσου μετώπου προσβολής στην είσοδο C στην Τερψιθέα, το “βρεχόμενο” μήκος της σήραγγας προέκυψε 28.916,27 m, ενώ η διατομή της είναι κυκλική με εσωτερική διάμετρο 3,5m. Κυρίως για την διευκόλυνση απαγωγής των αναμενόμενων εισροών επελέγησαν δύο ενδιάμεσα “υψηλά” σημεία στις θέσεις όπου αναμενόταν να συναντηθούν τα δύο προσεγγίζοντα το σημείο αυτό TBM. Στις θέσεις των σημείων αυτών B1 και D1 με υπερκείμενα 220 και 250 μέτρα αντίστοιχα κατασκευάστηκαν φρέατα εξαερισμού με καθαρή εσωτερική διάμετρο 0,25 m.

Η εσωτερική υδραυλική πίεση στη σήραγγα είναι συνάρτηση της θέσης των θυροφραγμάτων του φρέατος και της εξόδου και κυρίως της στάθμης του νερού στον ταμιευτήρα του Αγίου Δημητρίου, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2: Πιεζομετρική γραμμή στη σήραγγα Ευήνου Μόρνου. {Σημ: Η πιεζομετρική γραμμή αναφέρεται σε κλειστό θυρόφραγμα στην έξοδο)

Η υδραυλική ανάλυση της σήραγγας, για την δεδομένη διαρρύθμιση των λοιπών υδραυλικών εγκαταστάσεων (έργο εισόδου, έργο εξόδου, τοπική απώλεια στην θέση αλλαγής διεύθυνσης στην Τερψιθέα, θυροφράγματα), έδειξε ότι η παροχευτική ικανότητα εξαρτάται σχεδόν αποκλειστικά από την τραχύτητα της περιμέτρου της σήραγγας, ενώ οι τοπικές απώλειες έχουν πολύ μικρή επίδραση. Η παροχευτική ικανότητα αποκλειστικά στην σήραγγα υπολογίστηκε με την σχέση Manning- Strickler: $Q=A \cdot k_{st} \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2}$ από την οποία είναι εμφανής η βαρύτητα της επιλογής του συντελεστή k_{st} . Κατά την μελέτη επιλέχθηκαν οι τιμές $k_{st}=70(m^{1/3}/s)$ για το τμήμα της σήραγγας με μόνιμη επένδυση από προκατασκευασμένα στοιχεία και $k_{st}=85(m^{1/3}/s)$ για το τμήμα της σήραγγας με μόνιμη επένδυση από επί τόπου έγχυτο σκυρόδεμα με μεταλλότυπο. Μετά την λειτουργία της σήραγγας οι διενεργηθείσες ανάδρομες αναλύσεις έδειξαν ότι η επιλογή των συντελεστών αυτών και για τον χρόνο ζωής του έργου ήταν απολύτως σωστές (ίσως ελαφρά συντηρητικές για μεσοπρόθεσμη θεώρηση).

Ιδιαίτερης σημασίας για την εξέλιξη των μελετητικών θεωρήσεων υπήρξε η απαίτηση για περιορισμό των απωλειών νερού στην σήραγγα στο ύψος των 4lt/km*sec.

2. Η ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΕΥΗΝΟΥ ΜΟΡΝΟΥ

Η διάνοιξη της σήραγγας, βάσει της εγκριθείσας μελέτης, υλοποιήθηκε με την ταυτόχρονη λειτουργία τεσσάρων μηχανημάτων ολομέτωπης κοπής, δύο TBM ανοικτού τύπου από τα άκρα της σήραγγας (τμήματα AB1 και D1E1) και δύο TBM με διπλή τηλεσκοπική ασπίδα από ενδιάμεσο παράθυρο πρόσβασης (τμήματα C1B1 C2D1).

2.1 ΤΑ TBM ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΤΥΠΟΥ

Τα δύο ακραία τμήματα AB1 και D1E1 έχουν διάμετρο εκσκαφής 4,2 m, μήκη 8.090 και 4.185 m αντίστοιχα και τα διαχειρίστηκε η Αυστριακή εταιρεία Jaeger, μέλος της Αναδόχου Κοινοπραξίας. Για την διάνοιξη των τμημάτων αυτών χρησιμοποιήθηκαν δύο παρόμοια TBM ανοικτού τύπου (τμήμα AB1→TBM Kathrin, τμήμα D1E1→TBM Natalia) κατασκευής Robbins ενώ τα συστήματα υποστήριξης ήταν Rowa. Στις Εικόνες 1 και 2 φαίνονται τα δύο TBM μετά την συναρμολόγησή τους στις εισόδους των αντίστοιχων τμημάτων.



Εικόνα 1. TBM Kathrin στην είσοδο Α

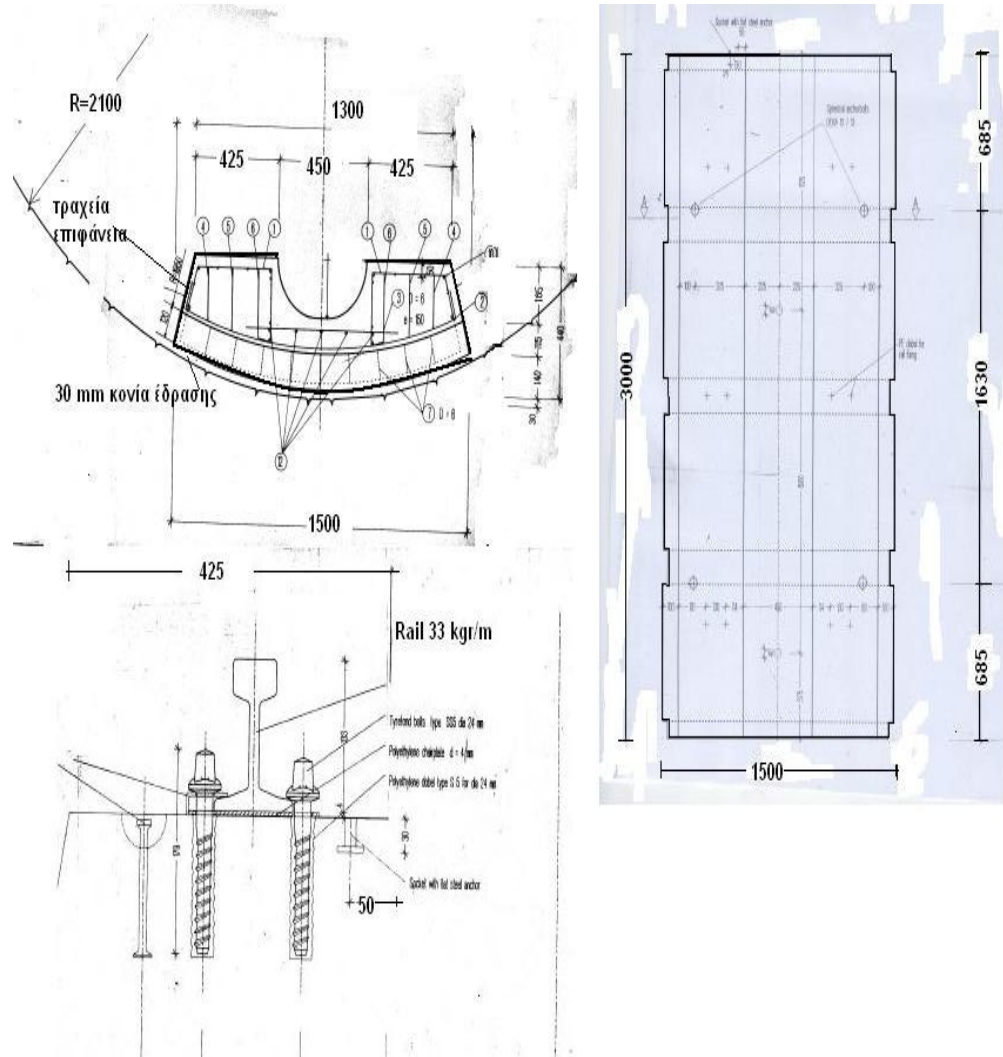


Εικόνα 2. TBM Natalia στην έξοδο Ε1

Και στα δύο TBM υπάρχει η δυνατότητα τοποθέτησης μεταλλικών πλαισίων και πλέγματος με ανυψωτικό μηχάνημα και αγκυρίων με δύο διατρητικούς βραχίονες ακριβώς πίσω από την προστασία της οροφής δηλαδή περίπου 3-4 μέτρα από το μέτωπο της διενεργούμενης εκσκαφής, ενώ το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα τοποθετείται από ειδική εξέδρα περίπου 20 μέτρα πίσω από το

μέτωπο. Από την ίδια εξέδρα είναι δυνατή η διάτρηση για αποστραγγιστικές οπές, τσιμεντενέσεις κ.λ.π.

Τα TBM και ο λοιπός εξοπλισμός κινούνται σε σιδηροτροχιές πάνω στα προκατασκευασμένα στοιχεία του πυθμένα που κατασκευάζονται από οπλισμένο σκυρόδεμα B35. Τα στοιχεία αυτά διαμορφώνουν επ' αυτών αποστραγγιστικό κανάλι και αποτελούν μέρος της αρχικής υποστήριξης αλλά και της μόνιμης επένδυσης. Στο εξωρράχιο των προκατασκευασμένων στοιχείων διαμορφώνονται εγκοπές που επιτρέπουν την έντεχνη τοποθέτηση των μεταλλικών πλαισίων. Στο Σχήμα 3 παρουσιάζονται οι κυριότερες κατασκευαστικές λεπτομέρειες του προκατασκευασμένου στοιχείου πυθμένα. Σημειώνουμε ότι ο οπλισμός του στοιχείου προορίζεται για την αντιμετώπιση των φορτίων από μετακίνηση, αποθήκευση, τοποθέτηση κ.λ.π.



Σχήμα 3: Κατασκευαστικές λεπτομέρειες προκατασκευασμένου στοιχείου πυθμένα για ανοικτού τύπου TBM.

Τα μηχανήματα διαθέτουν δύο πλευρικά έμβολα στήριξης (grippers) τα οποία στηρίζονται στο αποκαλυπτόμενο γεωυλικό και προωθούνται με την δημιουργούμενη αντίδραση από την δράση υδραυλικών μηχανισμών. Ορισμένες φορές σε γεωυλικά χαμηλών γεωμηχανικών χαρακτηριστικών είναι πιθανόν να παρατηρηθούν αστοχίες από την έδραση των grippers και να μην είναι εύκολη η επίτευξη της απαιτούμενης αντίδρασης ώστε να επιτευχθεί η προώθηση του

μηχανήματος. Στην εικόνα 3 φαίνεται θραύση του πετρώματος υπό την δράση του πλευρικού εμβόλου. Το βήμα προώθησης των TBM ήταν 1,5m.

Η υποστήριξη του ανοίγματος υπολογίστηκε σύμφωνα με την φιλοσοφία και προσέγγιση της NATM και χρήση των συνήθων μέτρων υποστήριξης (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, πλαίσια, αγκύρια). Μετά την ολοκλήρωση της διάνοιξης ακολούθησε η επένδυση της σήραγγας με σκυρόδεμα B25 ελάχιστου αποδεκτού πάχους 17cm.



Εικόνα 3. Θραύση πετρώματος υπό την δράση του gripper

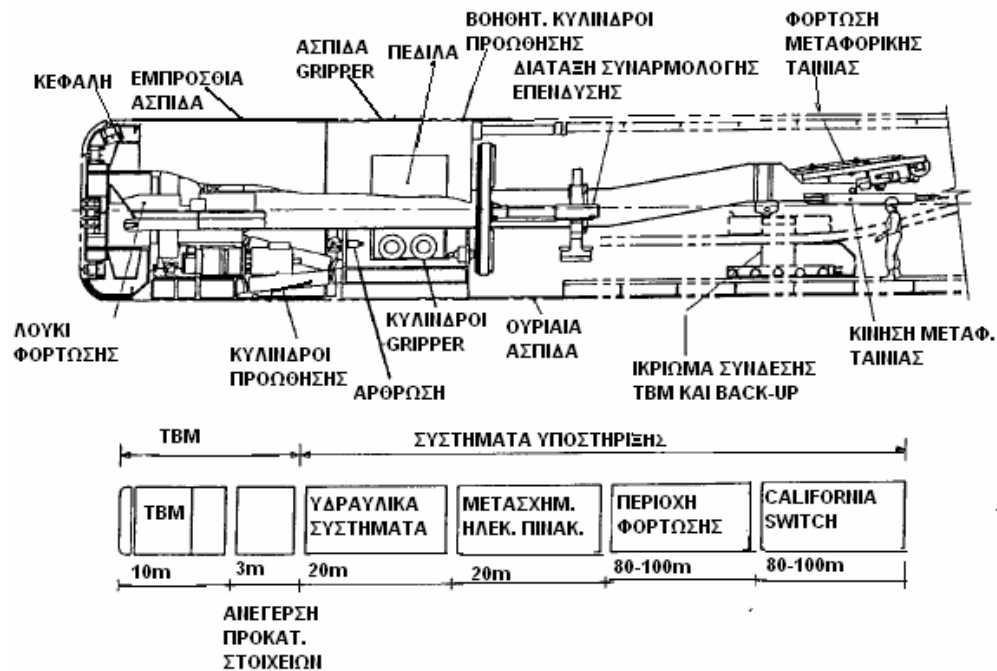
2.2. ΤΑ TBM ΜΕ ΔΙΠΛΗ ΤΗΛΕΣΚΟΠΙΚΗ ΑΣΠΙΔΑ

Τα δύο ενδιάμεσα τμήματα C1B1 C2D1 έχουν διάμετρο εκσκαφής 4,04 m και μήκη 9.407,03 και 7.126,13 m αντίστοιχα και τα διαχειρίστηκε η Ιταλική εταιρεία Seli, μέλος της Αναδόχου Κοινοπραξίας. Για την διάνοιξη των τμημάτων αυτών χρησιμοποιήθηκαν δύο TBM με διπλή τηλεσκοπική ασπίδα (τμήμα C1B1→TBM Salima, τμήμα C2D1 →TBM Ginevra), μέσα στην οποία περιλαμβάνεται και η διάταξη τοποθέτησης των εξαγωνικών προκατασκευασμένων στοιχείων της επένδυσης. Η υποστήριξη του ανοίγματος γίνεται με την τοποθέτηση των οπλισμένων προκατασκευασμένων στοιχείων της επένδυσης. Σημειώνουμε ότι η σύνδεση των δύο ανωτέρω τμημάτων υλοποιήθηκε με κλάδο μήκους 102,58m, που διανοίχθηκε με συμβατικές μεθόδους. Το συνολικό μήκος των δύο σηράγγων προσπέλασης ανέρχεται σε 580,87 m.

Τα δύο TBM ήταν μοντέλα 1111-234/2 και 118-221/2 της Robbins, ενώ τα συστήματα υποστήριξης σχεδιάστηκαν ειδικά για τις απαιτήσεις του έργου με

συνεργασία των Boretac και Seli (σχήμα 4). Παρακάτω παραθέτουμε ορισμένα τεχνικά χαρακτηριστικά των TBM:

- ✓ 27 Κοπτικοί δίσκοι κεφαλής 17"
- ✓ Μέγιστη συνιστώμενη ώθηση κοπτικής κεφαλής 5.600KN
- ✓ Μέγιστη ώθηση (σε πίεση 4000 psi) 7.200KN
- ✓ Ροπή στρέψης 830 KNm
- ✓ Δύο επιλογές της ταχύτητας περιστροφής της κοπτικής κεφαλής 8,93/4,46rpm ανάλογα με τις συνθήκες του σχηματισμού, καθώς και δυνατότητα αναστροφής της περιστροφής.
- ✓ Ενέργεια κίνησης κοπτικής κεφαλής 4 x 225 HP στις 1.500RPM (900HP ή 671,13KW), υδρόψυκτοι κινητήρες
- ✓ Μειωτήρες του συστήματος με υδραυλικούς συμπλέκτες
- ✓ Διπλή ασπίδα με πλήρως τηλεσκοπική άρθρωση. Στην ουριαία ασπίδα περιλαμβάνεται και η διάταξη συναρμολόγησης των προκατασκευασμένων στοιχείων της επένδυσης της σήραγγας. Η τοποθέτηση της κυψελοειδούς προκατασκευασμένης επένδυσης πραγματοποιείται σε μία απόσταση περίπου 10m από το εκσκαπτόμενο μέτωπο.
- ✓ Το βήμα προχώρησης με τα grippers σε έκταση ταυτίζεται περίπου με το πλάτος ενός δακτυλίου προκατασκευασμένης επένδυσης 1,25m (δυνατότητα βοηθητικού βήματος έως 1,98 m)
- ✓ Πλευρικά έμβολα στήριξης (grippers) για την απόληψη προωθητικής αντίδρασης σε γεωυλικά επαρκών μηχανικών χαρακτηριστικών.
- ✓ Οπίσθια (ουριαία) έμβολα για την προώθηση σε γεωυλικά χαμηλών μηχανικών χαρακτηριστικών, με απόληψη προωθητικής αντίδρασης από την επένδυση των προκατασκευασμένων στοιχείων. Δίνεται επίσης η δυνατότητα καθοδήγησης του TBM και διορθώσεων της πορείας του, σε δύσκολες συνθήκες, με χρησιμοποίηση διακριτών ουριαίων εμβόλων.
- ✓ Οπτικό – ηλεκτρονικό σύστημα καθοδήγησης, για την εξασφάλιση της απαιτούμενης ακρίβειας της θέσης του μηχανήματος.



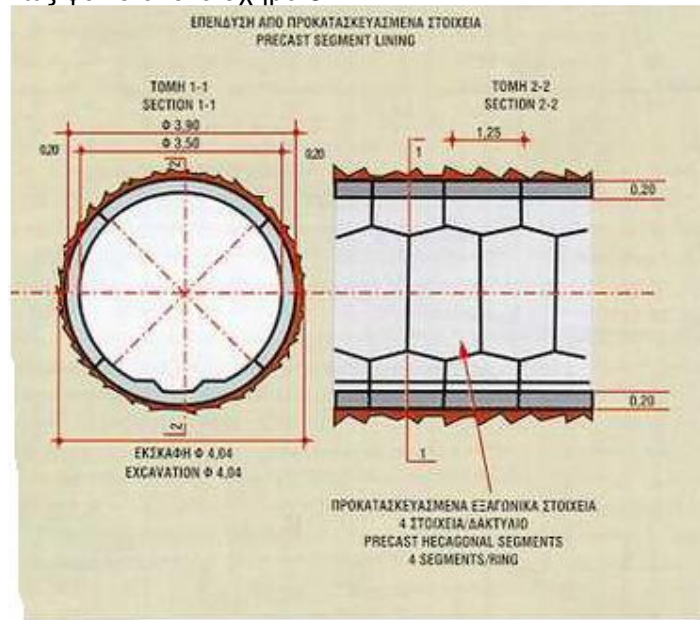
Σχήμα 4. Σχηματική διάταξη των TBM με διπλή ασπίδα με τα συστήματα υποστήριξης τους (Grantori et al 1995).

Στην εικόνα 4 εμφανίζονται τα δύο TBM στην φάση συναρμολόγησης και κατά την τελετή εισόδου στην σήραγγα.



Εικόνα 4. Συναρμολόγηση των TBM στο σημείο C και η είσοδός τους στην σήραγγα.

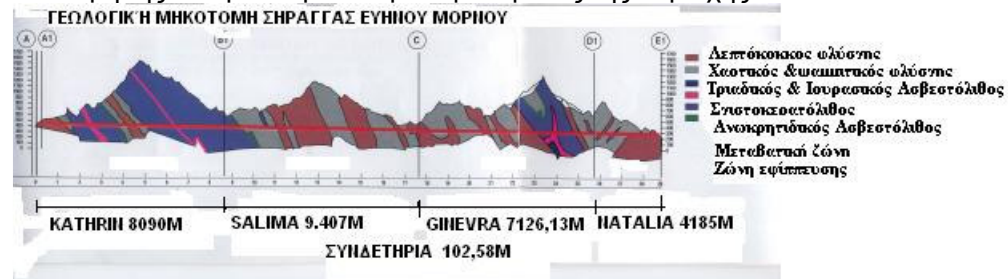
Τα προκατασκευασμένα στοιχεία της επένδυσης της σήραγγας συναρμολογούνται στον χώρο της ουριαίας ασπίδας από ειδική διάταξη και διαμορφώνουν μια εξαγωνική κυψελοειδή δομή όπως φαίνεται στο σχήμα 5.



Σχήμα 5. Διαμόρφωση της από προκατασκευασμένα στοιχεία επένδυσης της σήραγγας.

3. Η ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΔΙΕΛΕΥΣΗΣ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

Στο σχήμα 6 παρουσιάζεται η γεωλογική μηκοτομή της σήραγγας Ευήνου Μόρνου με βάση τις καταγραφές κατά την διάνοιξη και τα λοιπά στοιχεία που είχαν ενσωματωθεί στην διαδικασία δόμησης του γεωλογικού προσομοιώματος της περιοχής.



Σχήμα 6. Γεωλογική μηκοτομή σήραγγας Ευήνου Μόρνου.

Όπως φαίνεται στην μηκοτομή και αρχίζοντας από την είσοδο στο σημείο Α για ένα αρχικό μήκος περίπου 1700m η σήραγγα διασχίζει λεπτόκοκκο και χαοτικό φλύσχη. Επί του φλύσχη αυτού έχει επωθηθεί ο εν συνεχεία απαντώμενος ασβεστόλιθος με κατά τόπους σημαντικές εμφανίσεις σχιστοκερατολίθων. Μετά από μία εναλλαγή λεπτόκοκκου και χαοτικού φλύσχη εμφανίζεται δεύτερη επώθηση ξανά ασβεστόλιθου με αντίστοιχες εμφανίσεις σχιστοκερατολίθων. Το πέρας αυτού του σχηματισμού περί την Χ.Θ. 9+200 ακολουθείται από μία μεταβατική ζώνη από ασβεστόλιθο σε φλύσχη και εν συνεχεία μέχρι την έξοδο στο σημείο Ε1 από εναλλαγές λεπτόκοκκου και χαοτικού φλύσχη.

Για τις ιδιότητες των παραπάνω σχηματισμών αναφέρουμε εντελώς συνοπτικά τα παρακάτω:

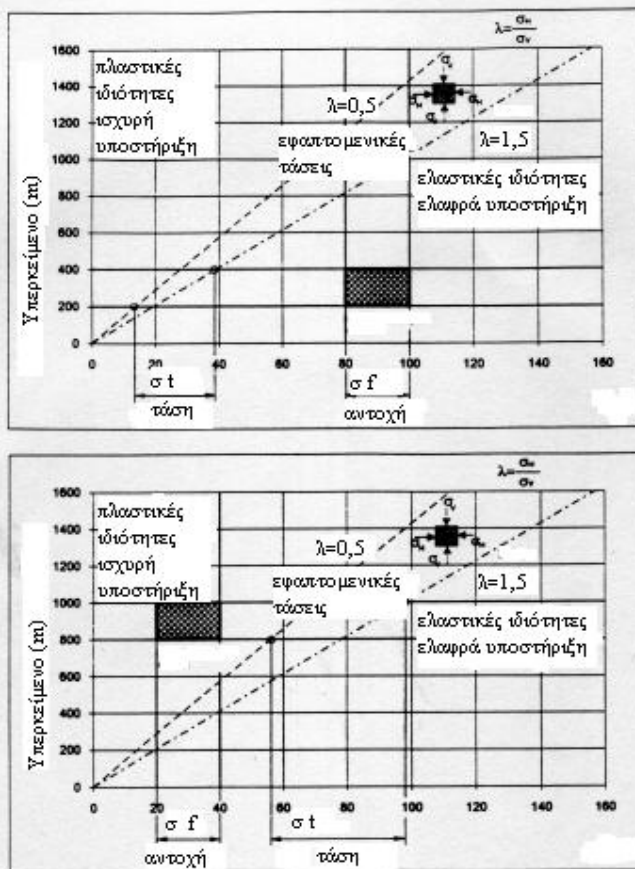
- **Λεπτόκοκκος φλύσχη:** πρόκειται για τυπική εναλλαγή λεπτών στρώσεων πηλινών με παρεμβολές λεπτών στρώσεων ψαμμινών και ιλυολίθων. Γενικά πρόκειται για πηλινικό φλύσχη με παρουσία και ψαμμινικών μελών (πηλίτες και ψαμμίτες παρουσιάζονται παντού). Οι πηλίτες μπορούν να είναι είτε ιλυόλιθοι με συμπαγή μορφή και διακριτή στρωματογραφία, είτε πιο αργιλικοί με την μορφή έως και αργιλικών σχιστολίθων. Λόγω του τεκτονικού καθεστώτος της περιοχής ο σχηματισμός παρουσιάζεται με σημαντικές πτυχωσεις, διαρρήξεις και ρηγματώσεις. Τα γεωμηχανικά του χαρακτηριστικά είναι μεταβαλλόμενα και μπορούν να αντιπροσωπευθούν μόνο με μεταβαλλόμενο εύρος τιμών, ενώ και ο βαθμός της τεκτονικής διαταραχής είναι καθοριστικός παράγων.
- **Χαοτικός και ψαμμινικός φλύσχη:** πρόκειται για ακανόνιστη ή χαοτική ιζηματογένεση ψαμμινών που εναλλάσσονται με πηλινικά μέλη. Και αυτός ο σχηματισμός είναι πτυχωμένος, διαρρηγμένος και ρηγματωμένος. Τα πηλινικά μέλη έχουν μεταβαλλόμενα γεωμηχανικά χαρακτηριστικά ενώ οι ψαμμίτες παρουσιάζουν συμπαγή μορφή. Το ποσοστό των ψαμμινών καθορίζει ουσιαστικά την αντοχή του σχηματισμού.
- **Τριαδικός και Ιουρασικός ασβεστόλιθος:** εμφανίζεται ως μέσο – έως και λεπτοστρωματώδης ασβεστόλιθος με λεπτές (πάχους κάποιων mm) στρώσεις αργίλου και κερατολιθικούς κονδύλους. Είναι συμπαγές, πτυχωμένο και διακλασμένο πέτρωμα.
- **Κερατόλιθοι:** πρόκειται για σχηματισμό ο οποίος εμφάνισε σημαντικά προβλήματα στη διάνοιξη της σήραγγας. Η εμφάνισή τους κατά μήκος της σήραγγας ξεπέρασε κατά πολύ τις αρχικές προβλέψεις για μήκος εμφάνισης περί τα 200 – 300m. Ο αρχικός χαρακτηρισμός “Κερατόλιθοι” είναι προτιμότερο και σωστότερο να γίνει “σχιστικερατόλιθοι” καθώς πρόκειται για λεπτές εναλλαγές πηλινικών μελών με κερατολιθικές στρώσεις με μεταβαλλόμενη παρουσία ραδιολαριτών. Τα πηλινικά μέλη έχουν μεταβαλλόμενα γεωμηχανικά χαρακτηριστικά, ενώ τα χαρακτηριστικά του όλου σχηματισμού καθορίζονται σε σημαντικό βαθμό από την περιεκτικότητα σε ραδιολάρια. Η απουσία μεταβατικής ζώνης μεταξύ ασβεστολίθων και σχιστοκερατολίθων ενισχύει την άποψη ότι η επαφή τους είναι τεκτονική εφίπτευση στο εσωτερικό του κύριου όγκου που εφιπτεύει τον φλύσχη της περιοχής. Στις περιοχές με σημαντική συμμετοχή πηλινικών μελών, έντονο κερματισμό, τεκτονική διάτμηση και μυλονιτοποίηση η βραχόμαζα προσομοιάζει με εδαφικό υλικό και παρουσιάζει συμπεριφορά συνθλίβοντος υλικού (squeezeing). Σε περιοχές με παρουσία και σκληρών πηλινών (π.χ. σκληρών ιλυολίθων) και κερατολίθων, έντονο κερματισμό, τεκτονική διάτμηση και μυλονιτοποίηση η βραχόμαζα παρουσιάζεται χαλαρή, με άμεση κατάρρευση (running).
- **Ασβεστόλιθος του Ανώτερου Κρητιδικού:** λεπτοστρωματώδης ασβεστόλιθος με πολύ λεπτές στρώσεις αργίλου και κερατολιθικούς κονδύλους, πτυχωμένος και ελαφρά διακλασμένος. Ιδιότητες παρόμοιες με αυτές του Τριαδικού και Ιουρασικού ασβεστολίθου.

- **Μεταβατικές ζώνες:** πρόκειται για μετάβαση υπό κανονικές συνθήκες ιζηματογένεσης από ασβεστόλιθο σε φλύσχη.

4. ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΘΕΩΡΗΣΕΙΣ – ΑΡΧΙΚΗ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΚΑΙ ΜΟΝΙΜΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗ

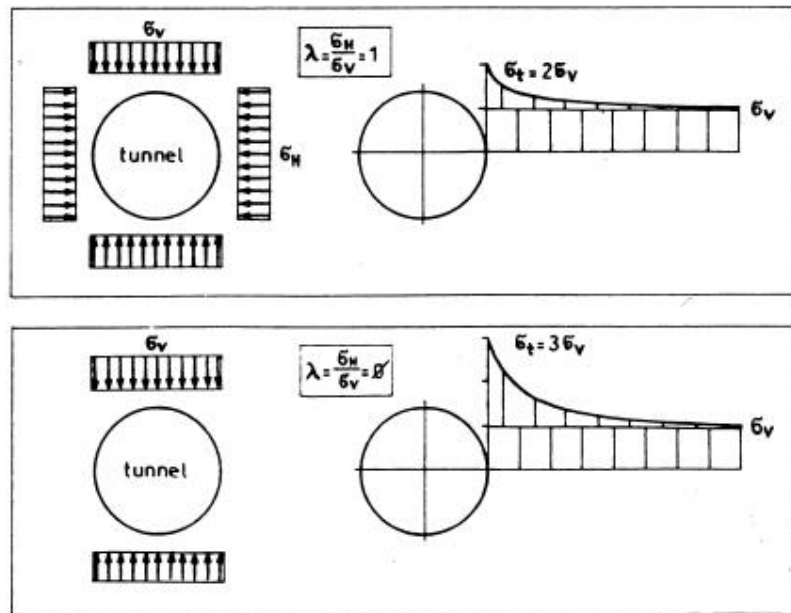
Με βάση την κατά τα ανωτέρω διάκριση των γεωλογικών σχηματισμών, την εκτίμηση των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών και το ύψος των υπερκειμένων, χωρίστηκαν κατά μήκος της σήραγγας 41 ομοιογενείς περιοχές. Σε κάθε τέτοια περιοχή έγινε κατ' αρχήν υπολογισμός των απαιτήσεων υποστήριξης και κατάταξη κάθε περιοχής στην προβλεπόμενη κατηγορία εφαρμογής μέτρων υποστήριξης με εφαρμογή εμπειρικών μεθόδων από αντίστοιχες προηγούμενες εφαρμογές.

Για τον κατ' αρχήν υπολογισμό των απαιτήσεων υποστήριξης χρησιμοποιήθηκαν τα διαγράμματα του σχήματος 7 που δείχνουν το μέγεθος των θεωρητικών εφαπτομενικών τάσεων στο τοίχωμα της σήραγγας σαν συνάρτηση του ύψους των υπερκειμένων. Η θλιπτική αντοχή της βραχώμαζας απεικονίζεται πάντα σαν εύρος τιμών περικλειόμενη μεταξύ δύο κάθετων ορίων. Όταν η εφαπτομενική τάση βρίσκεται κάτω από την θλιπτική αντοχή, οι παραμορφώσεις της βραχώμαζας είναι ελαστικές και η απαιτούμενη υποστήριξη είναι ελάχιστη. Στην περίπτωση που η εφαπτομενική τάση βρίσκεται πάνω από την θλιπτική αντοχή, αναμένεται η εκδήλωση αστοχιών στη βραχώμαζα και απαιτείται η εφαρμογή μέτρων υποστήριξης. Η απόσταση μεταξύ του ορίου διαχωρισμού ελαστικών και πλαστικών ιδιοτήτων δίνει ένα πρώτο μέτρο για την ποσότητα των απαιτούμενων μέτρων υποστήριξης.



Σχήμα 7: Διάγραμμα κατ' αρχήν υπολογισμού της απαίτησης για εφαρμογή μέτρων υποστήριξης.

Τα όρια του πεδίου των εφαπτομενικών τάσεων έχουν εξαχθεί από την θεωρία “άπειρου παχέως σωλήνα”. Έτσι ένα πλήρως συμμετρικό φορτίο οδηγεί σε εφαπτομενική τάση διπλάσια της αρχικής, ενώ ένα μονοαξονικό φορτίο οδηγεί σε εφαπτομενική τάση τριπλάσια της αρχικής. Για τους υπολογισμούς ελήφθησαν δύο ακραίες τιμές του $\lambda = \sigma_H / \sigma_V$, ήτοι $\lambda = 0,5$ που αντιστοιχεί κυρίως σε φορτίο οροφής και δίνει $\sigma_i = 2,5 \sigma_V$ και $\lambda = 1,5$ που λαμβάνει υπόψη οριζόντιες παραμένουσες τεκτονικές τάσεις και δίνει $\sigma_i = 3,5 \sigma_V$. Στο σχήμα 8 φαίνονται δύο ενδεικτικές περιπτώσεις υπολογισμού των εφαπτομενικών τάσεων.

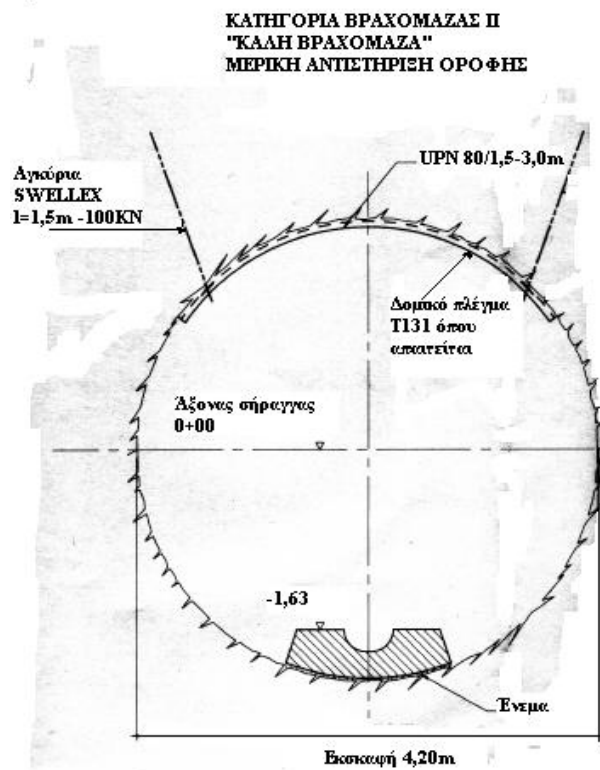


Σχήμα 8: Οι εφαπτομενικές τάσεις στο τοίχωμα της σήραγγας για $\lambda=1$ (υδροστατική φόρτιση) και για $\lambda=0$ (μονοαξονική φόρτιση)

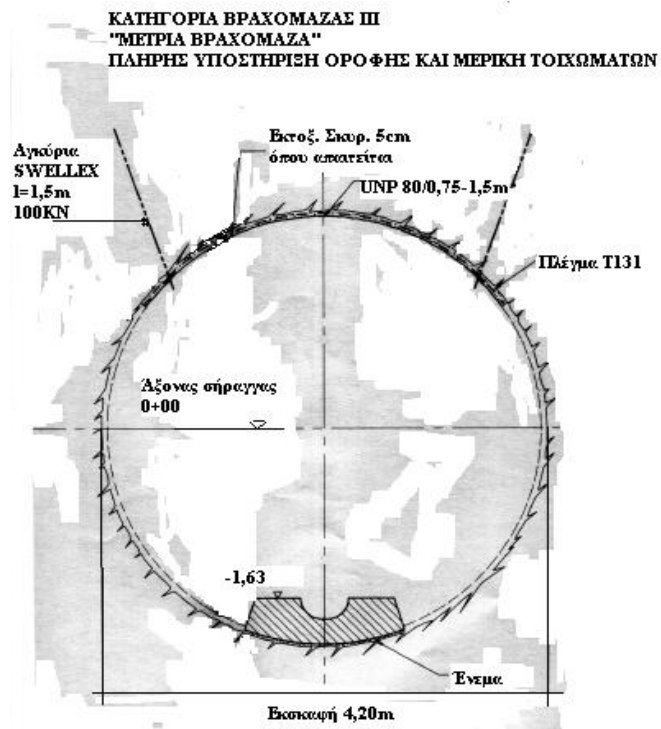
4.1. ΜΕΤΡΑ ΑΡΧΙΚΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΚΑΙ ΜΟΝΙΜΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗ ΚΑΤΑ ΝΑΤΜ

4.1.1. ΜΕΤΡΑ ΑΡΧΙΚΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΚΑΤΑ ΝΑΤΜ

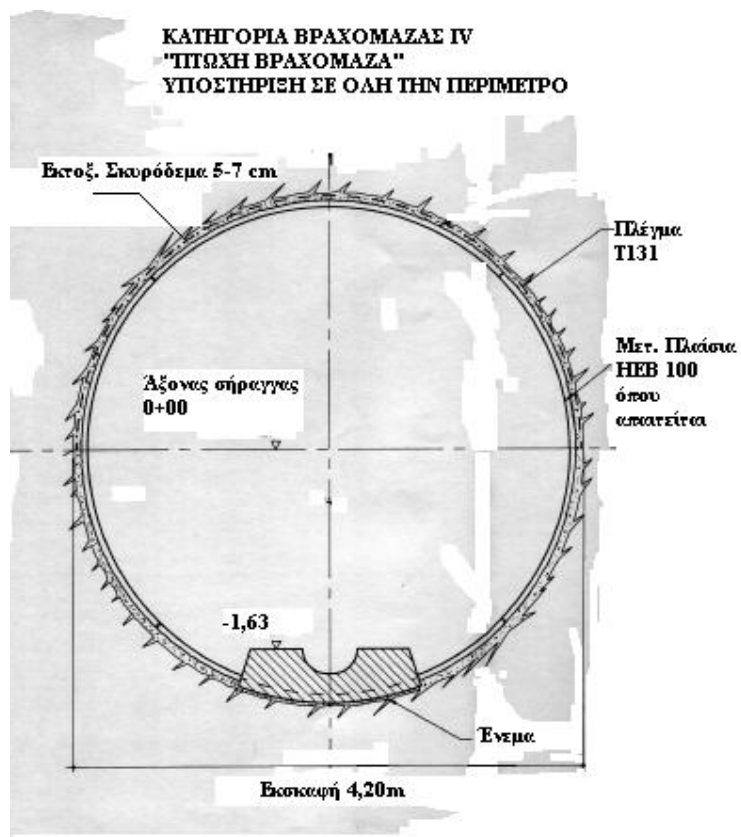
Με βάση την ανωτέρω διαδικασία καθορίστηκαν τα μέτρα υποστήριξης για την κάθε μία από τις τέσσερις κατηγορίες. Στα σχήματα 9 α, β, γ και δ παρουσιάζονται τα μέτρα υποστήριξης του δημιουργούμενου ανοίγματος.



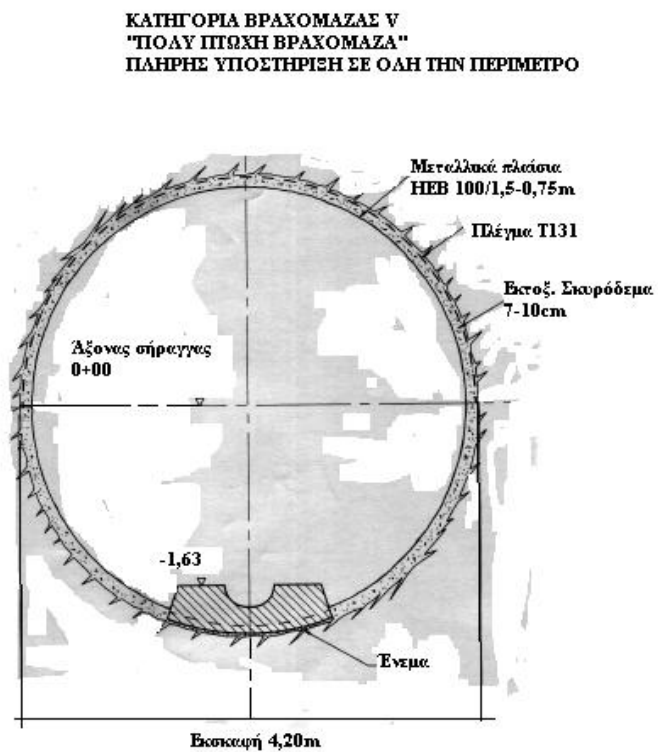
Σχήμα 9 α: Μέτρα υποστήριξης κατηγορίας II



Σχήμα 9 β: Μέτρα υποστήριξης κατηγορίας III



Σχήμα 9 γ: Μέτρα υποστήριξης κατηγορίας IV

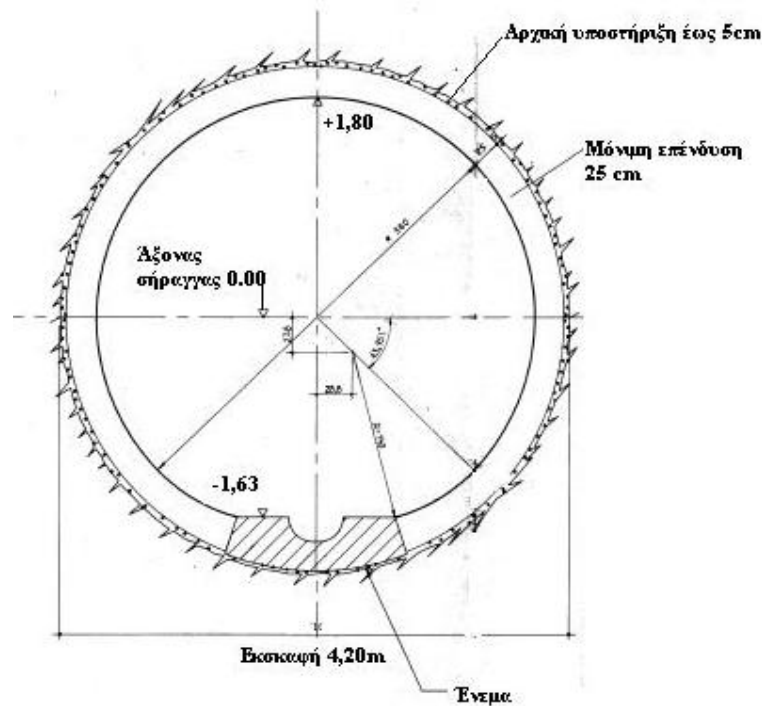


Σχήμα 9 δ: Μέτρα υποστήριξης κατηγορίας V

4.1.2. ΜΟΝΙΜΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗ ΚΑΤΑ ΝΑΤΜ

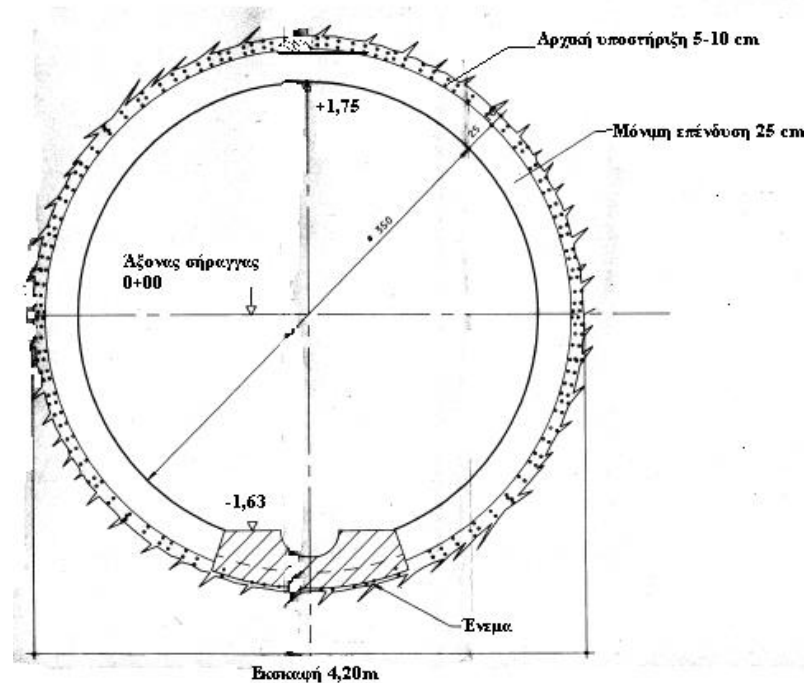
Η επί τόπου έγχυτη μόνιμη επένδυση παρουσιάζεται στα σχήματα 10 α και β.

ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΕΓΧΥΤΗ ΜΟΝΙΜΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ II & III



Σχήμα 10 α: Επί τόπου έγχυτη μόνιμη επένδυση κατηγοριών II & III

ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΜΟΝΙΜΗ ΕΓΧΥΤΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ IV & V



Σχήμα 10 β: Επί τόπου έγχυτη μόνιμη επένδυση κατηγοριών IV & V

Στα δύο τμήματα της σήραγγας που διανοίχτηκαν με ανοικτού τύπου TBM χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή της μόνιμης επένδυσης δύο διαφορετικά συστήματα. Στο τμήμα AB1 (TBM Kathrin) χρησιμοποιήθηκε σύστημα συνεχούς επένδυσης, ενώ στο τμήμα D1E1 (TBM Natalia) χρησιμοποιήθηκε ένα συμβατικό σύστημα επένδυσης διαδοχικών σκυροδετήσεων.

A) Συνεχές σύστημα επένδυσης

Ο όρος “συνεχές σύστημα επένδυσης” περιγράφει ένα σύστημα με το οποίο η σκυροδέτηση και η μετακίνηση των μεταλλότυπων γίνεται ταυτόχρονα και συνεχώς στην διάρκεια του χρόνου εργασίας. Αποτελείται από ένα τηλεσκοπικό μεταλλότυπο συνολικού μήκους 90m (10 αυτόνομα τμήματα των 9m), ένα τραίνο μεταφοράς σκυροδέματος συνολικής ικανότητας 21 m³ (τρεις βαρέλες των 7 m³) και αντλία σκυροδέματος δυναμικότητας 30 m³/h.



Εικόνα 5: Μεταλλότυπος συστήματος συνεχούς σκυροδέτησης

B) Σύστημα επένδυσης διαδοχικών σκυροδετήσεων

Ο όρος “σύστημα επένδυσης διαδοχικών σκυροδετήσεων” περιγράφει ένα σύστημα με το οποίο η σκυροδέτηση και η μετακίνηση των μεταλλότυπων γίνεται διαδοχικά σε ακολουθία στην διάρκεια του χρόνου εργασίας. Αποτελείται από ένα μη τηλεσκοπικό μεταλλότυπο συνολικού μήκους 63 m (7 αυτόνομα τμήματα των 9m), ένα τραίνο μεταφοράς σκυροδέματος συνολικής ικανότητας 21 m³ (τρεις βαρέλες των 7 m³) και αντλία σκυροδέματος δυναμικότητας 50 m³/h.



Εικόνα 6: Μεταλλότυπος και επανανάμιξη σκυροδέματος στο τμήμα D1E1

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο τα αγκύρια, τα μεταλλικά πλαίσια, το δομικό πλέγμα και τα προκατασκευασμένα στοιχεία πυθμένα τοποθετούνται κοντά στο μέτωπο εκσκαφής (περίπου στα 3μ). Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα καθώς και τυχόν πρόσθετο δομικό πλέγμα τοποθετούνται από την ειδική πλατφόρμα περίπου 20 m πίσω από το μέτωπο εκσκαφής.

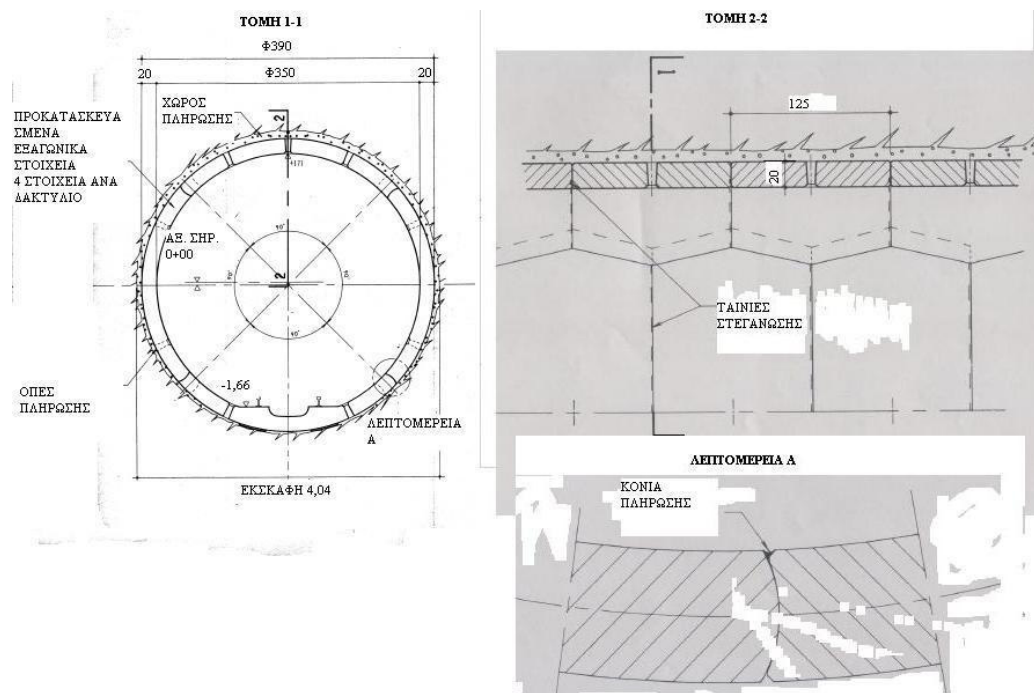
Η φέρουσα ικανότητα της αρχικής υποστήριξης, της μόνιμης επένδυσης και του συνδυασμού αυτών παρουσιάζονται στον πίνακα 1.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: Φέρουσα ικανότητα			
RMC	Αρχική Υποστήριξη (σε KN/M2)	Μόνιμη επένδυση (σε KN/M2)	Σύνολο (σε KN/M2)
II	0	3214	3214
III	633(για κλειστό δακτύλιο	2678	3311
IV	960	3000	3960
V	1475	2678	4153

4.2. ΜΕΤΡΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΣΤΑ ΔΙΠΛΗΣ ΑΣΠΙΔΑΣ ΤΒΜ

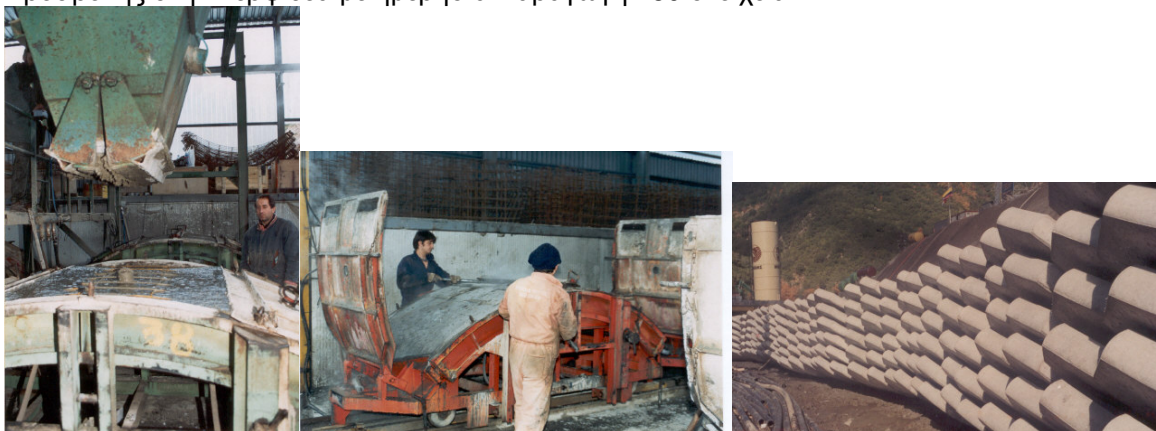
Η εκσκαφή της σήραγγας και η συναρμολόγηση της προκατασκευασμένης τμηματικής επένδυσης εκτελούνται παράλληλα. Η διάμετρος εκσκαφής είναι 4,04m, η καθαρή εσωτερική διάμετρος 3,50 m και το πάχος των προκατασκευασμένων στοιχείων 0,20 m. Η ανέγερση της επένδυσης γίνεται σε μία απόσταση περίπου 10-13 m πίσω από το μέτωπο εκσκαφής στην ουριαία ασπίδα. Το κενό μεταξύ ορίου εκσκαφής και δακτυλίου επένδυσης γεμίζει με κοκκώδες υλικό (γαρμπίλι) το οποίο εν συνεχεία ενεματώνεται (σε μία απόσταση περίπου 100-150 m πίσω από την ανεγειρόμενη επένδυση) με πίεση περίπου 1,5 bar. Το σχήμα 11 δείχνει τα σχέδια της επένδυσης.

Το γαρμπίλι που γεμίζει το κενό είναι επιθυμητό να είναι αυτούσιο κοσκινιστό πλυμένο με ισομεγέθεις κόκκους διαμέτρου 8-12mm. Στην περίπτωση χρήσης θραυστού γαρμπιλιού τότε καταβάλεται προσπάθεια για απόληψη κόκκων κυβικού σχήματος, για επίτευξη καλύτερης κατανομής του υλικού και πλήρωση του κενού χώρου. Το μέτρο παραμορφωσιμότητας της ζώνης με το κοκκώδες υλικό εξαρτάται από την κοκκομετρική κατανομή των κόκκων, το σχήμα τους και την μέθοδο τοποθέτησης και συμπίκνωσης και σύμφωνα με μετρήσεις κυμαίνεται από 30 έως 130 N/mm². Πάντως λόγω του μικρού πάχους της ζώνης του γαρμπιλιού, η παραμόρφωση αυτής λόγω των διαφορετικών μέτρων κυμαίνεται μεταξύ 1 και 4mm, μέγεθος που αντιστοιχεί σε πολύ μικρή σύγκλιση και πρακτικά σημαίνει ότι το στατικό σύστημα συμπληρώνεται με την τοποθέτηση του γαρμπιλιού (η εκτέλεση των τσιμεντενέσεων πλήρωσης της ζώνης του γαρμπιλιού σχετίζεται με τις απαιτήσεις στεγανότητας της σήραγγας)



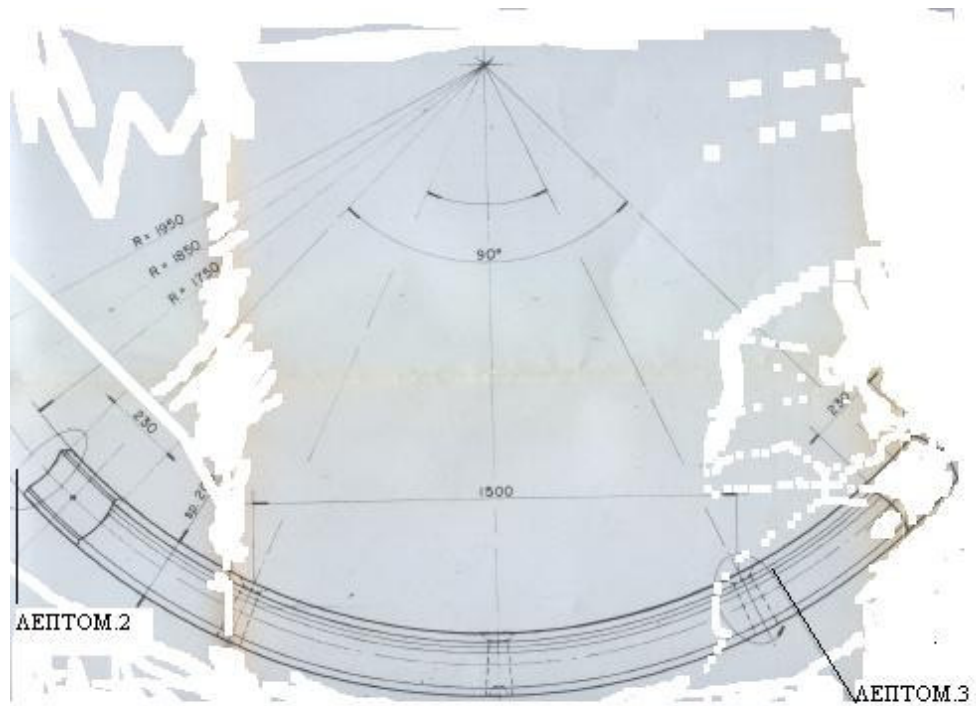
Σχήμα 11: Διαμόρφωση της επένδυσης με προκατασκευασμένα στοιχεία.

Κάθε δακτύλιος αποτελείται από 4 προκατασκευασμένα από σκυρόδεμα B35 στοιχεία και έχει αυτοτελές μήκος 1,25m. Το βάρος κάθε στοιχείου ήταν περίπου 1.700 Kgr και κατασκευάστηκαν σε ειδικό εργοστασιακό χώρο (εικόνα 7) στην είσοδο του ενδιαμέσου μετώπου προσβολής στην Τερψιθέα με ημερήσια παραγωγή 250 στοιχεία.

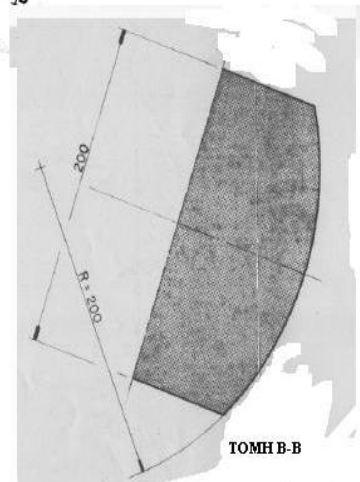
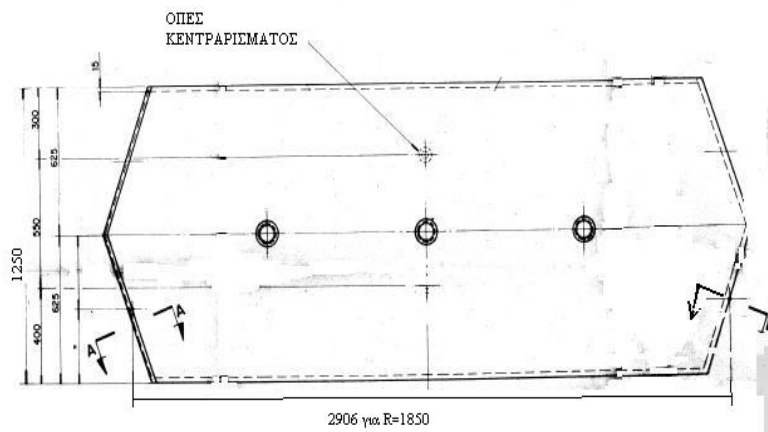


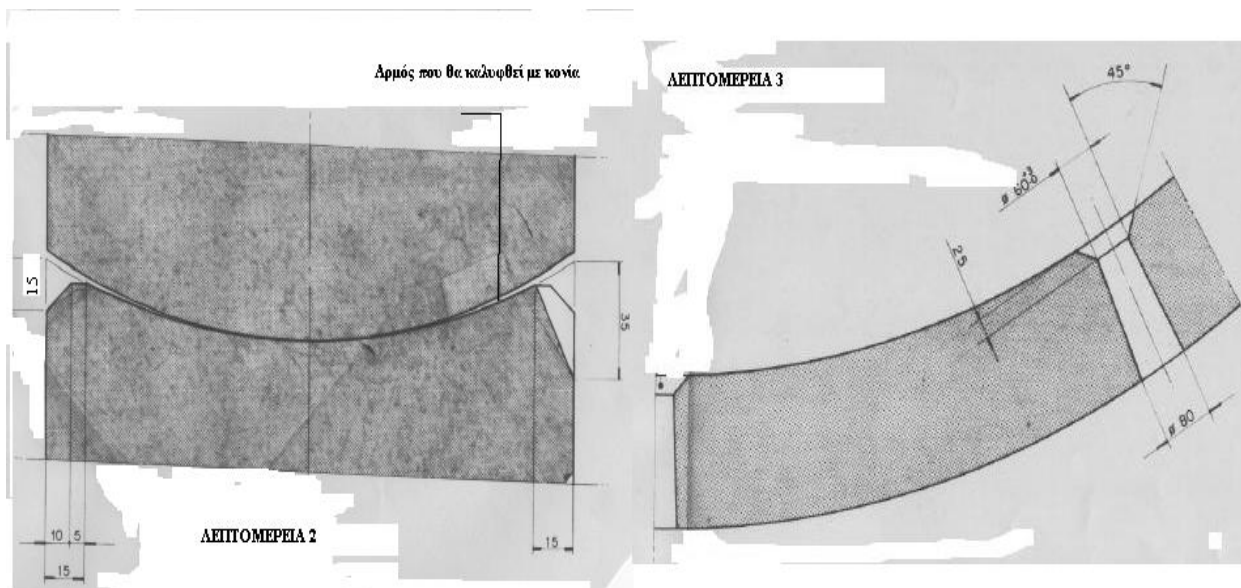
Εικόνα 7: Παραγωγή των προκατασκευασμένων στοιχείων στην Τερψιθέα

Η εξαγωνική ή κυψελοειδής προκατασκευασμένη επένδυση που υιοθετήθηκε στο τμήμα της σήραγγας Ευήνου Μόρνου υπήρξε μία πρωτοπόρα λύση για μια σήραγγα υπό πίεση. Τα προκατασκευασμένα στοιχεία είναι όλα, με εξαίρεση προφανώς το στοιχείο πυθμένα, του ίδιου σχήματος με προφανή πλεονεκτήματα στην απλοποίηση της παραγωγικής διαδικασίας. Τα στοιχεία συναρμολογούνται και σχηματίζουν αυτουποστηριζόμενους δακτυλίους με απουσία πλήρους περιφερειακού αρμού. Ο οπλισμός των στοιχείων καλύπτει τις δράσεις που αναπτύσσονται κατά την μεταφορά, αποθήκευση, τοποθέτηση και την ασφαλή μεταφορά των φορτίων στην έννοια των ακτινικών αρμών. Στο σχήμα 12 παρουσιάζονται οι λεπτομέρειες διαμόρφωσης των προκατασκευασμένων στοιχείων.



ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΟΡΟΦΗΣ ΚΑΙ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ





Σχήμα 12: Διαμόρφωση προκατασκευασμένων στοιχείων οροφής και τοιχωμάτων

Τα εξαγωνικά προκατασκευασμένα στοιχεία, όπως φαίνεται από το σχήμα 12, έχουν σχεδιαστεί στις επιφάνειες επαφής έτσι ώστε να απουσιάζει οποιαδήποτε αιχμή ή εντορμία που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε υψηλές θλίψεις ή εφελκυσμούς στις περιοχές μεταβίβασης των φορτίων. Οι σε επαφή επιφάνειες των στοιχείων διαμορφώνονται με κοίλες και κυρτές διαμορφώσεις διαφορετικών ακτινών, έτσι ώστε η περιοχή μεταβίβασης του φορτίου να περιορίζεται στο κέντρο του αρμού.

4.2.1. ΕΠΕΝΔΥΣΗ ΜΕ ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ: ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΠΙΕΣΗΣ

Στο τμήμα της σήραγγας με επένδυση προκατασκευασμένων στοιχείων η υδραυλική ανάλυση δείχνει ότι η μέγιστη εσωτερική πίεση ανέρχεται σε 5,2 bar (0,52 N/mm²) και συνεπώς πρέπει να εξασφαλιστεί η σταθερότητα της κατά τα ανωτέρω επένδυσης έναντι αυτής της πίεσης.

Η εφαρμογή της εσωτερικής πίεσης στην επενδεδυμένη σήραγγα υπολογίστηκε με την συνδυασμένη επίθεση του πεδίου ελαστικών τάσεων λόγω της εσωτερικής πίεσης στο πεδίο ελαστο-πλαστικών τάσεων λόγω της εκσκαφής. Με τις παρακάτω παραδοχές:

- μέγιστη εσωτερική πίεση λειτουργίας 5,2 bar
- ελάχιστη τιμή μέτρου ελαστικότητας της βραχόμαζας $E=1000\text{MN/m}^2$
- απλή αλλά πλήρης 'έδραση' της επένδυσης με πλήρωση των κενών μεταξύ αυτής και της βραχόμαζας

προέκυψε ότι η αύξηση του μήκους της περιφέρειας της σήραγγας είναι 8,5mm και συντηρητικά εκτιμήθηκε ισόποσο άνοιγμα του αρμού μεταξύ προκατασκευασμένων στοιχείων. Η τιμή αυτή συγκρίνεται με το άνοιγμα των 220 mm που υπολογίστηκε από τις κινηματικές συνθήκες για να υπάρξει απώλεια στήριξης και αποδεικνύει την ύπαρξη επαρκούς περιθωρίου ασφαλείας.

Η εξασφάλιση της ευστάθειας της σήραγγας στη μέγιστη εσωτερική πίεση, προϋποθέτει την κατασκευαστική εκπλήρωση των παραδοχών, την έντεχνη εκτέλεση των εργασιών και ειδικότερα:

- Επίτευξη πλήρους επαφής των προκατασκευασμένων στοιχείων με την περιβάλλουσα βραχόμαζα μέσω της τοποθέτησης του κοκκώδους υλικού και των τσιμεντενέσεων πλήρωσης.
- Η κατά τα ανωτέρω απαιτούμενη επαφή εξασφαλίζεται πλήρως και στις περιπτώσεις των υπερεκσκαφών

- Το κενό μεταξύ προκατασκευασμένων στοιχείων και περιβάλλουσας βραχόμαζας πληρώνεται με τα προβλεπόμενα υλικά και όχι με πιθανές καταπτώσεις από το όριο εκσκαφής
- Οι παραμένουσες ιδιότητες του γεωυλικού, μετά την εκσκαφή, δεν είναι ιδιαίτερα χαμηλές
- Η ποιοτική στάθμη παραγωγής, διακίνησης, αποθήκευσης και συναρμολόγησης των προκατασκευασμένων στοιχείων δεν δημιουργεί κατασκευαστικές ατέλειες στα ανοίγματα των ατμών και ζημιές στις οξείες γωνίες των κοίλων παρειών.

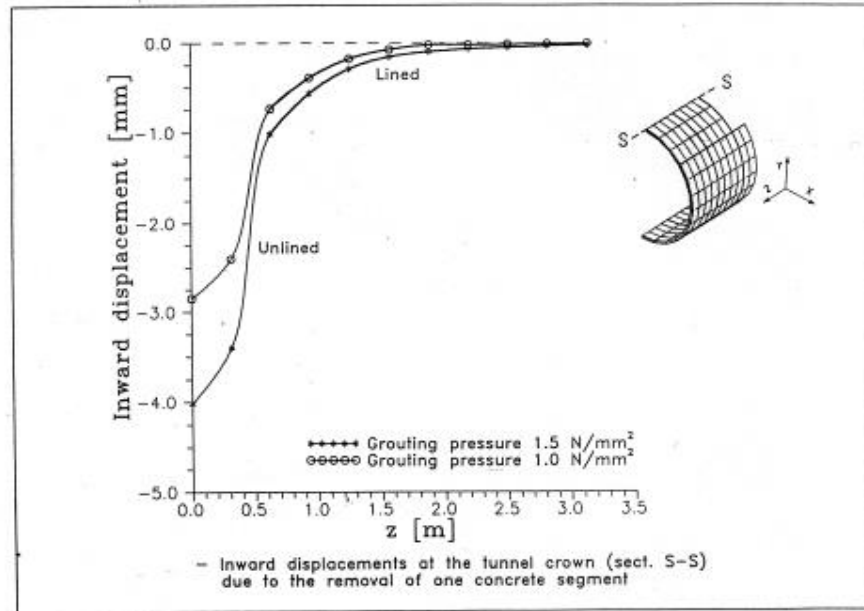
Το θέμα επιλύθηκε και από τους ειδικούς συμβούλους καθηγητές Carlo Urbano και Giancarlo Gioda, με μία σειρά ελαστοπλαστικών αναλύσεων με διδιάστατο κώδικα πεπερασμένων στοιχείων οι οποίες ουσιαστικά επιβεβαίωσαν τα αποτελέσματα των αναλυτικών επιλύσεων. Τα αποτελέσματα αυτών των αναλύσεων συνοψίζονται ως εξής:

- Η μέγιστη εσωτερική πίεση μπορεί να επιφέρει στην επένδυση, περιφερειακές εφαιπτομενικές τάσεις, οι οποίες οδηγούν σε άνοιγμα των αρμών των προκατασκευασμένων στοιχείων όταν η “μακροχρόνια” πίεση τσιμεντενέματος μειωθεί κάτω από 0,2N/ mm² (2bar)
- Η πρόβλεψη για εκτέλεση συστηματικών τσιμεντενέσεων σταθεροποίησης με πιέσεις 15-20 bar επιτρέπει να θεωρήσουμε ότι δεν αναμένεται οποιαδήποτε ζημιά στην επένδυση. Πράγματι η θεώρηση ότι η “μακροχρόνια” πίεση τσιμεντενέματος, μπορεί να μειωθεί λόγω ερπυσμού ή/και συρρίκνωσης-συστολής του τσιμεντενέματος έως και το 1/7 της αρχικής τιμής είναι ρεαλιστική έως συντηρητική.
- Στην περίπτωση της πλήρους απώλειας της “μακροχρόνιας” πίεσης τσιμεντενέματος το άνοιγμα των αρμών της επένδυσης υπολογίστηκε ότι θα είναι μικρότερο από 1 mm, που δεν έχει καμμία πρακτική επίπτωση στη ευστάθεια της επένδυσης για τους αναφερθέντες γεωμετρικούς – κινηματικούς περιορισμούς.

4.2.2. ΕΠΕΝΔΥΣΗ ΜΕ ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ: ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΥΠΟ ΤΗΝ ΠΡΟΫΠΟΘΕΣΗ ΤΟΠΙΚΗΣ ΤΥΧΗΜΑΤΙΚΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΠΕΝΔΥΣΗ.

Στην διαδικασία εξέτασης των μελετών ετέθη το θέμα της συνολικής ευστάθειας της επένδυσης της σήραγγας αν αστοχήσει για οποιοδήποτε λόγο κάποιο στοιχείο, δηλαδή μία αλυσιδωτή επέκταση της ζημιάς, ένα είδος domino effect. Το θέμα επιλύθηκε από τους ειδικούς συμβούλους καθηγητές Carlo Urbano και Giancarlo Gioda με την διενέργεια αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων σε τριδιάστατο προσομοίωμα, το οποίο αναπαράγει τις περιφερειακές και διαμήκεις δράσεις στην επένδυση και στην γειτονία του αστοχήσαντος στοιχείου. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων συνοψίζονται ως εξής:

- Η επί πλέον παραμόρφωση της βραχόμαζας σαν αποτέλεσμα της αστοχίας ενός προκατασκευασμένου στοιχείου, είναι περιορισμένη (ακτινικές μετατοπίσεις 3-4 mm), όπως στο σχήμα 13, επομένως δεν αναμένονται αξιόλογες αστοχίες στην βραχόμαζα.



Σχήμα 13: Προς το εσωτερικό μετακινήσεις στην οροφή της σήραγγας λόγω της αστοχίας ενός στοιχείου.

- Σε ότι αφορά την ασφάλεια των γειτονικών, προς το αστοχήσαν, στοιχείων τα αποτελέσματα των υπολογισμών έδειξαν ότι οι τιμές των καμπτικών ροπών και ορθών δυνάμεων στα στοιχεία είναι πάντα κάτω από την οριακή αντοχή του οπλισμένου σκυροδέματος (υπολογίστηκε σύμφωνα με το ACI 318). Συνεπώς η αστοχία ενός στοιχείου δεν επεκτείνει την αστοχία στην κυψελοειδή επένδυση.

5. ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΣΤΕΓΑΝΟΤΗΤΑΣ – ΤΣΙΜΕΝΤΕΝΕΣΕΙΣ

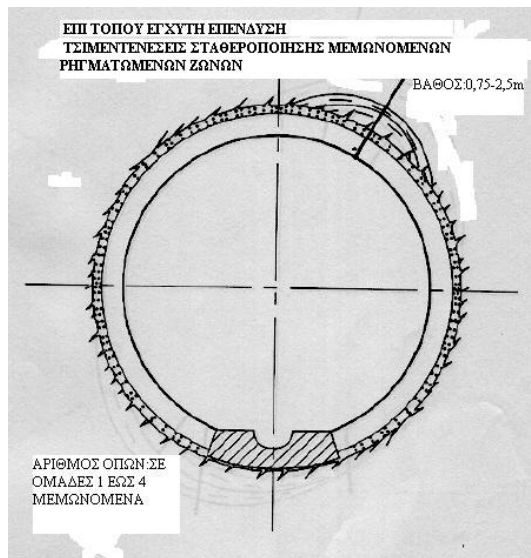
Σύμφωνα με τους όρους των τευχών δημοπράτησης η μέγιστη επιτρεπόμενη απώλεια νερού στην σήραγγα είναι 4l/Km.sec, που πρακτικά σημαίνει απαίτηση για στεγανή σήραγγα. Η φιλοσοφία της επίτευξης "στεγανής" σήραγγας βασίζεται στην διαδραστική αλληλεπίδραση των επί μέρους στοιχείων του συστήματος επένδυση-βραχομάζα-υδροφόρος ορίζοντας-ενέματα. Με βάση τα χαρακτηριστικά των ανωτέρω στοιχείων και επί μέρους απαιτήσεις (π.χ. περιβαλλοντικοί όροι, μακροχρόνια συμπεριφορά του συστήματος κ.λ.π.) διαμορφώθηκε το ιδιαίτερα σημαντικό και εκτεταμένο πρόγραμμα τσιμεντενέσεων

5.1. ΤΣΙΜΕΝΤΕΝΕΣΕΙΣ

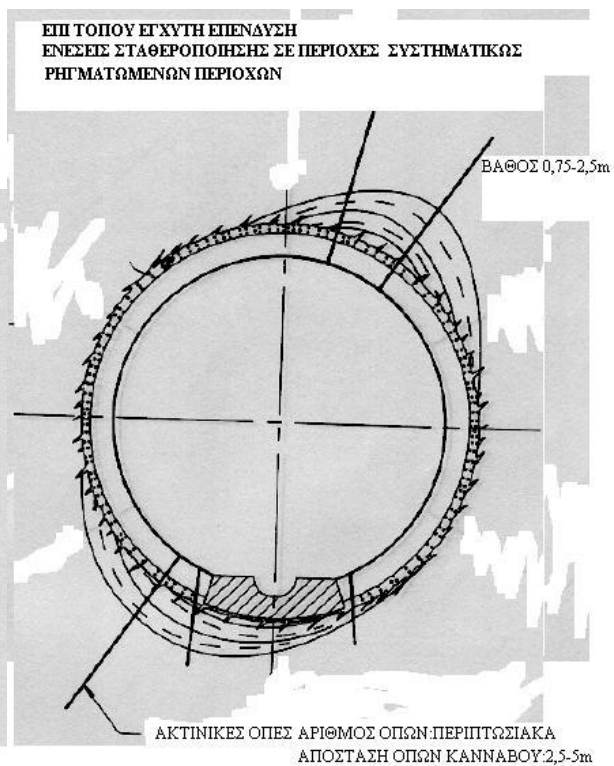
Στον πίνακα 2 παρουσιάζονται συνοπτικά οι αρχικά προβλεπόμενες εργασίες και τα είδη τσιμεντενέσεων που εκτελέστηκαν στις διάφορες φάσεις κατασκευής ενώ στο σχήμα 14 οι διατάξεις των τσιμεντενέσεων.

Οι κατά τα ανωτέρω γενικές αρχές εξειδικεύτηκαν, μετά την γνώση και καταγραφή των πραγματικών δεδομένων που απαντήθηκαν κατά την διάνοιξη της σήραγγας, με την σύνταξη των προγραμμάτων τσιμεντενέσεων.

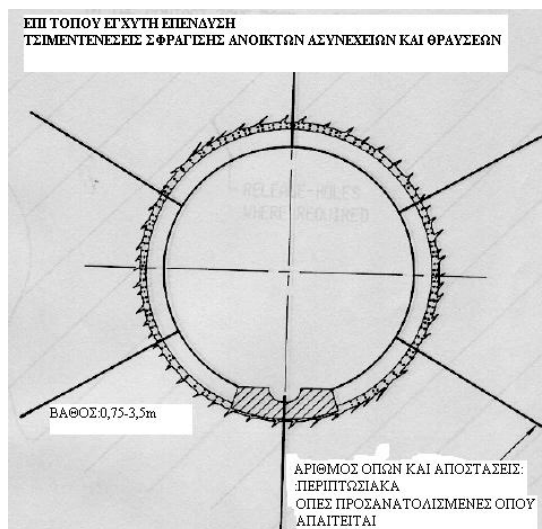
ΠΙΝΑΚΑΣ 2: ΤΣΙΜΕΝΤΕΝΕΣΕΙΣ ΣΤΗ ΣΗΡΑΓΓΑ ΕΥΗΝΟΥ ΜΟΡΝΟΥ				
Α) ΤΜΗΜΑΤΑ ΜΕ ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΕΓΧΥΤΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗ				
ΜΕΘΟΔΟΣ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΣΧΕΔΙΟ	ΠΙΕΣΗ	ΕΝΕΜΑ
1. Επαφής στοιχείου πυθμένα	Χαμηλής πίεσης κάτω από στοιχείο πυθμένα για πλήρη επαφή με βραχώμαζα	Κάθε στοιχείο συστηματικά	-	Κονία πληρώσεως
2.Επαφής οροφής	Χαμηλής πίεσης στην οροφή στο κενό μεταξύ έγχυτης επένδυσης και αρχικής υποστήριξης	Κάθε 9m, οπές μόνο στη οροφή	Έως 7 bar	Αιώρημα νερού τσιμέντου
3. Σταθεροποίησης	Θεραπεία ρηγματωμένων περιοχών, σταθεροποίηση υποβαθμισμένης βραχώμαζας για επίτευξη ενιαίων συνθηκών έδρασης της επένδυσης. 2 ^ο και 3 ^ο στάδιο αν απαιτείται	Σχήμα 14 α και β	10-15 bar	Σταθερό ανάμιγμα
4. Σταθεροποίησης σφράγισης ανοικτών ασυνεχειών και θραύσεων	Ενίσχυση περιβάλλουσας βραχώμαζας, αποφυγή διάβρωσης στους αρμούς και γύρω από την σήραγγα 2 ^ο και 3 ^ο στάδιο αν απαιτείται	Σχήμα 14 γ και δ	10-15 bar	Σταθερό ανάμιγμα
5.Ενέσεις αγωγών αποστράγγισης	Σφράγιση των διόδων νερού	1.Σφράγιση της επιφάνειας με εκτοξ. σκυρόδ. υδρομάστευση με αγωγούς 2.Ενεμάτωση των αγωγών σχήμα 14 ε	10-15 bar	Σταθερό ανάμιγμα
Β) ΤΜΗΜΑΤΑ ΜΕ ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΗ ΚΥΨΕΛΟΕΙΔΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗ				
1. Πλήρωσης	Χαμηλής πίεσης πλήρωσης του Κενού μεταξύ επένδυσης και βραχώμαζας, που ήδη έχει προπληρωθεί με γαρμπίλι	Συστηματικά 100 – 150m πίσω από την συναρμολόγηση της επένδυσης	-	Σταθερό ανάμιγμα
2. Σταθεροποίησης	Θεραπεία ρηγματωμένων περιοχών, σταθεροποίηση υποβαθμισμένης βραχώμαζας για επίτευξη ενιαίων συνθηκών έδρασης της επένδυσης. 2 ^ο και 3 ^ο στάδιο αν απαιτείται	Σχήμα 14 στ	10-15 bar	Σταθερό ανάμιγμα
3. Σταθεροποίησης σφράγισης ανοικτών ασυνεχειών και θραύσεων	Ενίσχυση περιβάλλουσας βραχώμαζας, αποφυγή διάβρωσης στους αρμούς και γύρω από την σήραγγα 2 ^ο και 3 ^ο στάδιο αν απαιτείται	Σχήμα 14 ζ και η	10-15 bar	Σταθερό ανάμιγμα
4. Ενέσεις αγωγών αποστράγγισης	Σφράγιση των διόδων νερού	Ενεμάτωση των αγωγών αποστράγγισης σε συνδυασμό με σχήμα 14 ζ	10-15 bar	Σταθερό ανάμιγμα



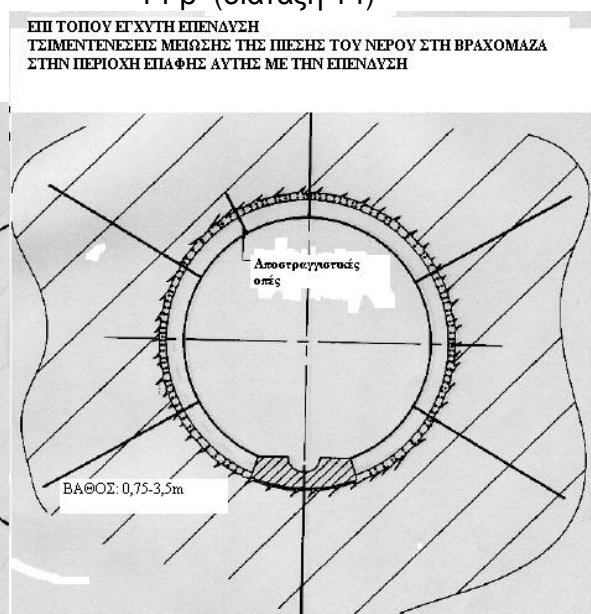
14 α (διάταξη 13)



14 β (διάταξη 14)

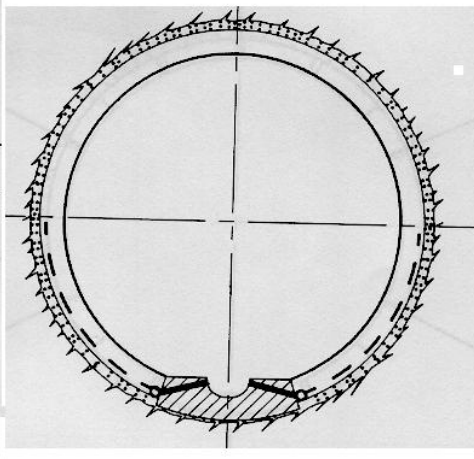


14 γ (διάταξη 15)



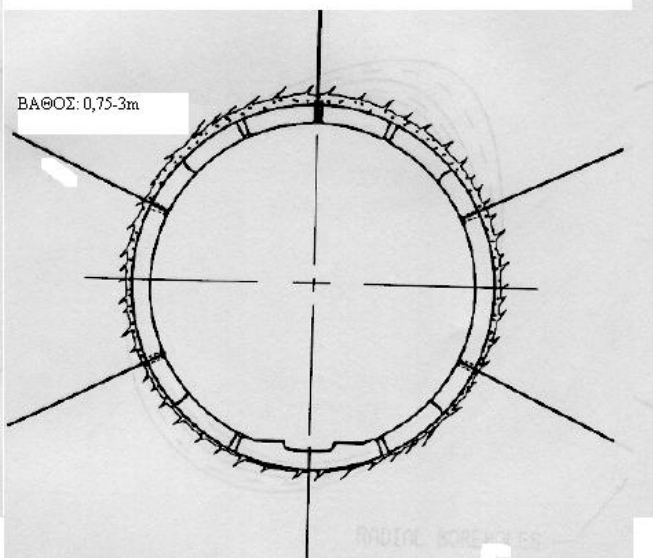
14δ (διάταξη 16)

ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΕΓΧΥΤΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗ
ΕΝΕΜΑΤΩΣΗ ΑΠΟΣΤΡΑΓΓΙΣΤΙΚΩΝ ΔΙΩΓΩΝ



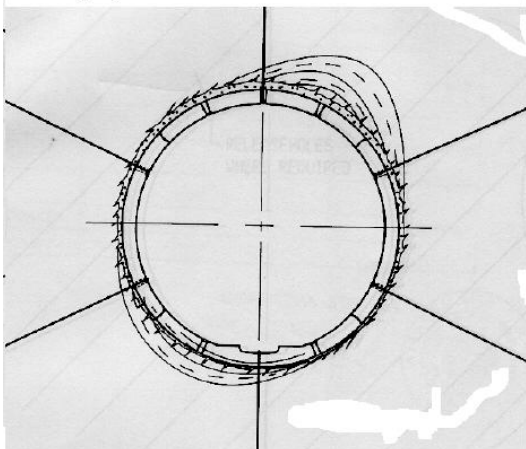
14 ε (διάταξη 17)

ΕΠΕΝΔΥΣΗ ΜΕ ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ
ΤΣΙΜΕΝΤΕΝΕΣΕΙΣ ΣΦΡΑΓΙΣΗΣ ΑΝΟΙΚΤΩΝ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΘΡΑΥΣΕΩΝ



14στ (διάταξη 18)

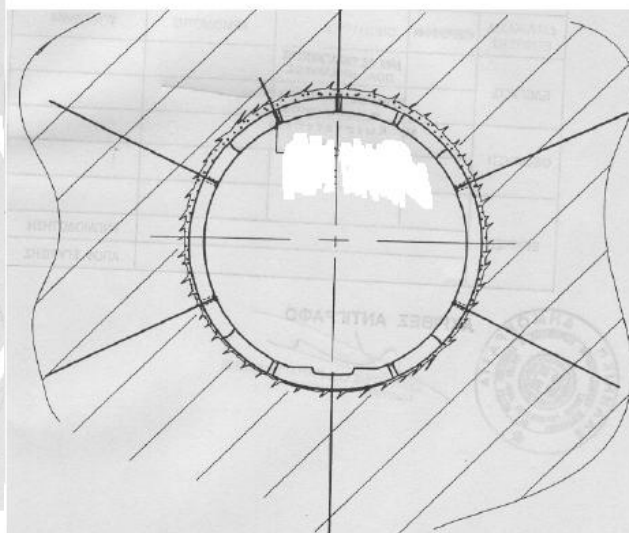
ΕΠΕΝΔΥΣΗ ΜΕ ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΙΚΕΣ ΤΣΙΜΕΝΤΕΝΕΣΕΙΣ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ
6 ΟΠΕΣ ΣΕ ΑΠΟΣΤΑΣΕΙΣ 2,5-5,0 m,
ΒΑΘΟΣ: 0,75-2,5m



14ζ (διάταξη 19)

Σχήμα 14: Διάταξη τσιμεντενέσεων

ΕΠΕΝΔΥΣΗ ΜΕ ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ
ΤΣΙΜΕΝΤΕΝΕΣΕΙΣ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ
ΣΤΗΝ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΜΕ ΤΗΝ ΕΠΕΝΔΥΣΗ



14 η (διάταξη 20)

5.1.1. ΣΗΡΑΓΓΑ ΜΕ ΕΠΕΝΔΥΣΗ ΑΠΟ ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Στα τμήματα αυτά της σήραγγας εφαρμόστηκαν συνεχώς τσιμεντενέσεις σταθεροποίησης σύμφωνα με την διάταξη 19 (σχήμα 14ζ). Σε ζώνες υπερεκσκαφών οι τσιμεντενέσεις εκτελούνται με πυκνότερο κάνναβο και μεταβλητό μήκος οπών.

5.1.2. ΣΗΡΑΓΓΑ ΜΕ ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΕΓΧΥΤΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗ

Για τον καθορισμό του προγράμματος τσιμεντενέσεων στα τμήματα αυτά καταγράφηκαν τα παρακάτω βασικά δεδομένα:

- Το είδος του γεωλογικού σχηματισμού
- Η συμπεριφορά της βραχώμαζας
- Οι γεωλογικές υπερεκσκαφές

- Η χωροστάθμιση του δαπέδου
- Οι συγκλίσεις της σήραγγας
- Το υδραυλικό καθεστώς στην βραχώμαζα (πιέσεις – εισροές νερού)

Στα τμήματα αυτά εκτελέστηκαν οι παρακάτω τσιμεντενέσεις:

- 1) Τσιμεντενέσεις επαφής στοιχείου πυθμένα, κατά την εκσκαφή συστηματικά
- 2) Τσιμεντενέσεις επαφής οροφής, με πίεση 7 bar κάθε 9m.
- 3) Τσιμεντενέσεις σταθεροποίησης. Στο σχήμα 15 δείχνουμε την πλήρη καταγραφή των βασικών δεδομένων για τον καθορισμό του προγράμματος τσιμεντενέσεων και την επιλογή εφαρμογής των καθορισμένων διατάξεων (αναφορά στο σχήμα 14)

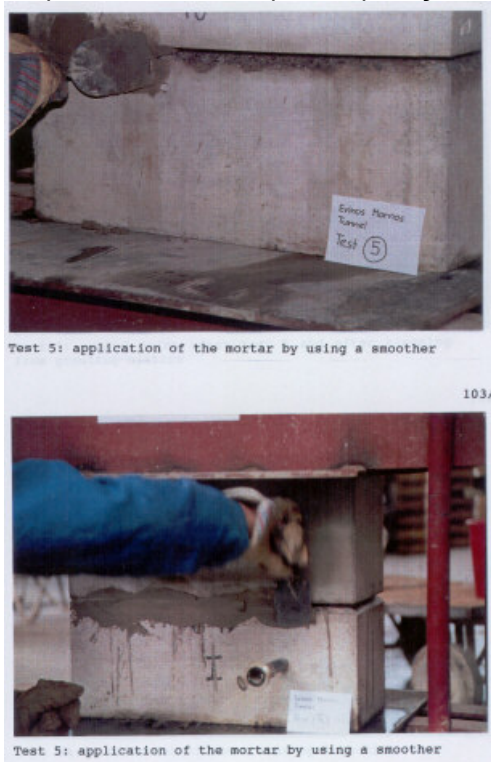
5.2. ΣΤΕΓΑΝΩΣΗ ΤΩΝ ΑΡΜΩΝ ΤΩΝ ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.

Α) ΤΜΗΜΑ ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΕΓΧΥΤΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ.

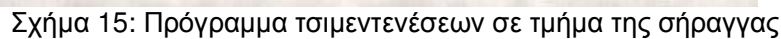
Οι διαμήκεις αρμοί μεταξύ του προκατασκευασμένου στοιχείου πυθμένα και της επί τόπου έγχυτης επένδυσης δεν απαιτούν άλλη επεξεργασία πέρα από τον επιμελή καθαρισμό της τραχείας επιφάνειας του προκατασκευασμένου στοιχείου. Οι ακτινικοί αρμοί μεταξύ των προκατασκευασμένων στοιχείων πυθμένα στεγανοποιούνται με μια στεγανωτική λωρίδα για την εξασφάλιση της δυνατότητας εκτέλεσης της τσιμεντένεσης επαφής.

Β) ΤΜΗΜΑ ΜΕ ΕΠΕΝΔΥΣΗ ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Οι κύριες λειτουργίες της σφράγισης των αρμών των προκατασκευασμένων στοιχείων είναι η εξασφάλιση της εκτέλεσης όλων των προβλεπόμενων τσιμεντενέσεων με τις απαιτούμενες πιέσεις και η πλήρωση του κενού των αρμών με τσιμεντένεμα. Δοκιμάστηκαν στο εργαστήριο διάφορες μέθοδοι και υλικά σφράγισης και επελέγη τελικά η σφράγιση με μία έτοιμη ενός συστατικού τσιμεντοειδή κονία με προσθήκη συνθετικού υλικού (Sika Mono Top 620) και εφαρμογή με μυστρί. Στην εικόνα 8 φαίνεται η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την διενέργεια της δοκιμής ενώ στην εικόνα 9 τα αποτελέσματα της δοκιμής με την εκτέλεση της τσιμεντένεσης, όπου σαφώς εμφανίζεται η διήθηση καθαρού νερού δια μέσου της κονίας και το γέμισμα του αρμού με το υλικό του τσιμεντενέματος.



Εικόνα 8: Διάταξη για την διενέργεια δοκιμής στεγάνωσης αρμού.





Εικόνα 9: Διήθηση καθαρού νερού δια μέσου της κονιάς στεγάνωσης.



Εικόνα 10: Σφράγιση αρμών στην σήραγγα

6. ΟΙ ΑΠΟΔΟΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ ΤΩΝ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΤΒΜ ΚΑΙ ΤΑ ΚΥΡΙΟΤΕΡΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΔΙΑΝΟΙΞΗ

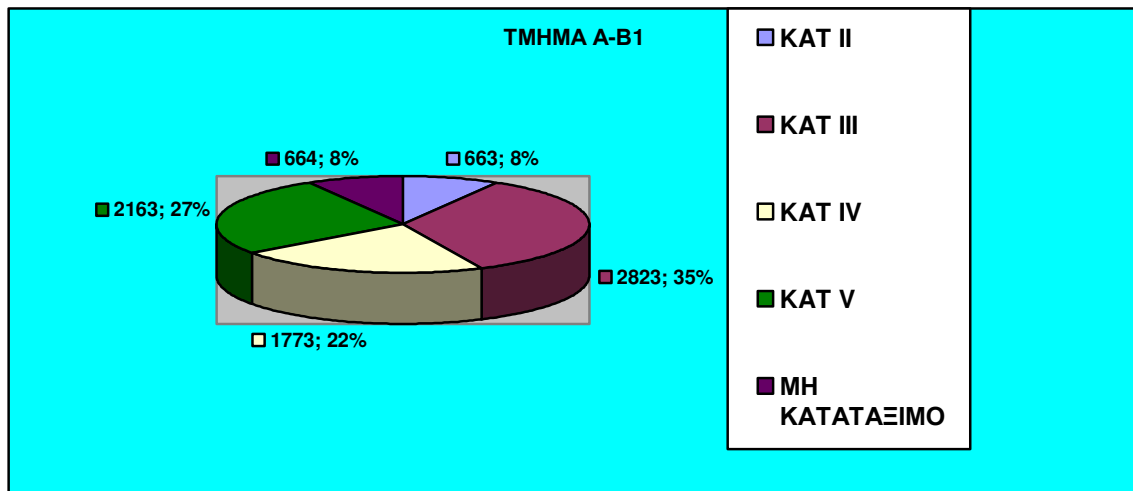
Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω για την γεωμηχανική ταξινόμηση της βραχώμαζας η σύμβαση προέβλεπε την χρήση της ταξινόμησης κατά R.M.R.. Στα τμήματα που διανοίγονται με ανοικτού τύπου ΤΒΜ και αρχική υποστήριξη κατά NATM οι κατά R.M.R. κατηγορίες αντιστοιχήθηκαν στις κατηγορίες υποστήριξης και αυτή η κατάταξη αποτελεί και την βάση πληρωμής της Αναδόχου, σε συνδυασμό και με τις τιμές μονάδας της προσφοράς του.

Η ανωτέρω ταξινόμηση κατά R.M.R. αποδείχθηκε κατ' αρχήν χρήσιμο και αξιόπιστο εργαλείο για τους σκοπούς που προβλεπόταν η χρήση της, παρουσίασε όμως και σημαντικά προβλήματα σε ότι αφορά την εφαρμοσιμότητά της στους συγκεκριμένους σχηματισμούς. Τα προβλήματα αυτά μπορούν να συνοψισθούν ως εξής:

- Η συλλογή των στοιχείων των παραμέτρων της βραχώμαζας για να χρησιμοποιηθούν στην ταξινόμηση είναι δύσκολη. Ο βαθμός δυσκολίας είναι σημαντικά μεγαλύτερος στα ΤΒΜ διπλής ασπίδας, συνεπώς η αξιοπιστία της ταξινόμησης είναι μειωμένη.

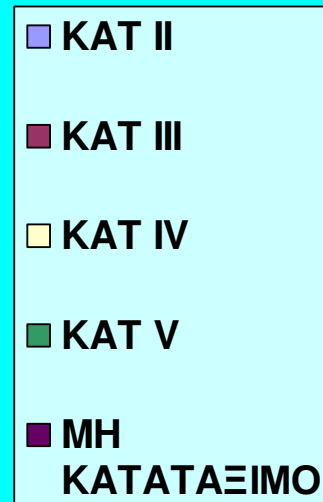
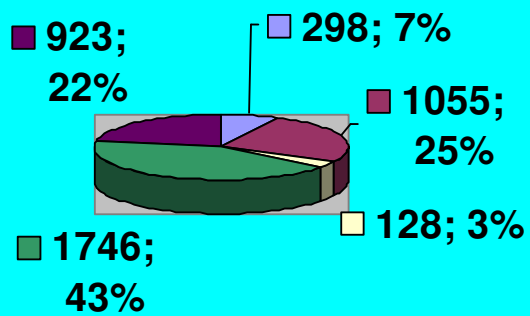
- Ο καθορισμός των επί μέρους παραμέτρων της βραχόμαζας απαιτεί κατ' αρχήν την ύπαρξη βραχόμαζας. Όταν η βραχόμαζα έχει απωλέσει την στοιχειώδη δομική της συγκρότηση, τότε μεταπίπτει σε εδαφικού τύπου μάζα όπου η διάκριση παραμέτρων βραχόμαζας είναι χωρίς έννοια και περιεχόμενο.
- Οποιοσδήποτε σχηματισμός πέραν από τον χαρακτηρισμό "διακλασμένης βραχόμαζας" δεν μπορεί να ταξινομηθεί με το σύστημα R.M.R.
- Το σύστημα R.M.R. προβλέπει την κατηγορία V σαν την χειρότερη κατηγορία, συνεπώς ότι είναι χειρότερο από αυτή αναφέρεται σε σχηματισμό "μη κατατάξιμο με το το σύστημα R.M.R."
- Το σύστημα R.M.R. έχει ενσωματώσει μικρό αριθμό σήραγγων σε κατηγορία V, συνεπώς η αξιοπιστία του για πολύ πτωχές βραχόμαζες είναι συζητήσιμη και η εφαρμογή του υπόκειται σε περιορισμούς.
- Η διαχείριση σχηματισμών που επιδεικνύουν χρονικά συνητημένη συμπεριφορά δεν ενδείκνυται να γίνεται με το σύστημα R.M.R. Το ίδιο ισχύει και για σχηματισμούς χωρίς συνοχή (καταρρέοντα υλικά).
- Η παρουσία μη υδροστατικού φυσικού εντατικού πεδίου, λόγω π.χ. παραμενουσών ή "κλειδωμένων" τεκτονικών τάσεων, δεν είναι διαχειρίσιμη και δεν αξιολογείται από το το σύστημα R.M.R.
- Το σύστημα R.M.R. δεν αξιολογεί την πίεση υπερκειμένων (που στην σήραγγα Ευήνου Μόρνου λαμβάνει εξαιρετικά υψηλές τιμές)
- Γεγονότα όπως έντονη έκλυση αερίου με συνέπεια την εκκένωση της σήραγγας και συνεπώς την παραμονή ανυποστήρικτης σήραγγας , ή διακοπές στην ομαλή τροφοδοσία του εξοπλισμού με ηλεκτρικό ρεύμα δεν αξιολογούνται αν και μπορεί να έχουν σημαντικές συνέπειες τόσο στην ευστάθεια όσο και στους ρυθμούς προχώρησης αλλά και το κόστος των εργασιών.

Με βάση όλα τα παραπάνω η γεωμηχανική ταξινόμηση της βραχόμαζας όπως πραγματικά αποκαλύφθηκε κατά την διάνοιξη περιλαμβάνει τις κατηγορίες II, III, IV, V και την κατηγορία των μη κατατάξιμων κατά R.M.R. σχηματισμών με συμπεριφορά συνθλίβοντος ή καταρρέοντος υλικού. Στα σχήματα 16 α, β, γ και δ δίνονται οι χαρακτηρισμοί των σχηματισμών για τα τμήματα AB1, D1E1, CB1 και CD1 αντίστοιχα.



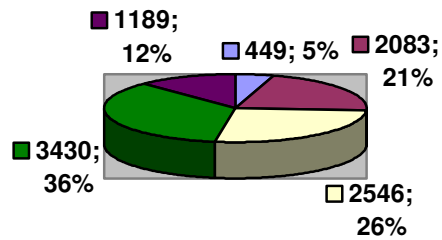
16.α

ΤΜΗΜΑ D1-E1



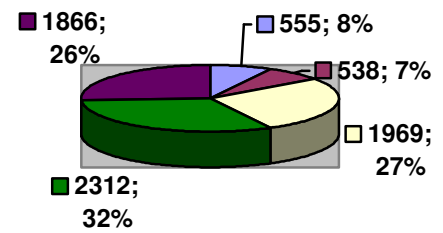
16.β

ΤΜΗΜΑ CB1 TBM SALIMA



16.γ

ΤΜΗΜΑ CD1 TBM GINEVRA

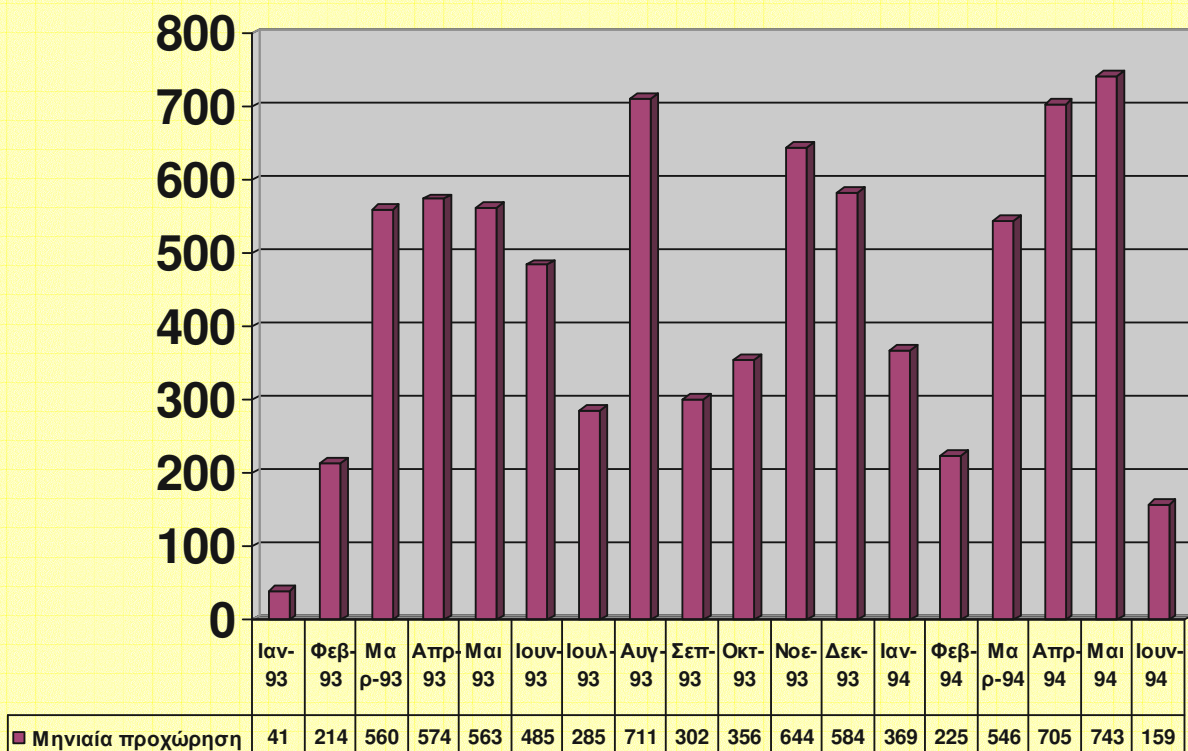


16.δ

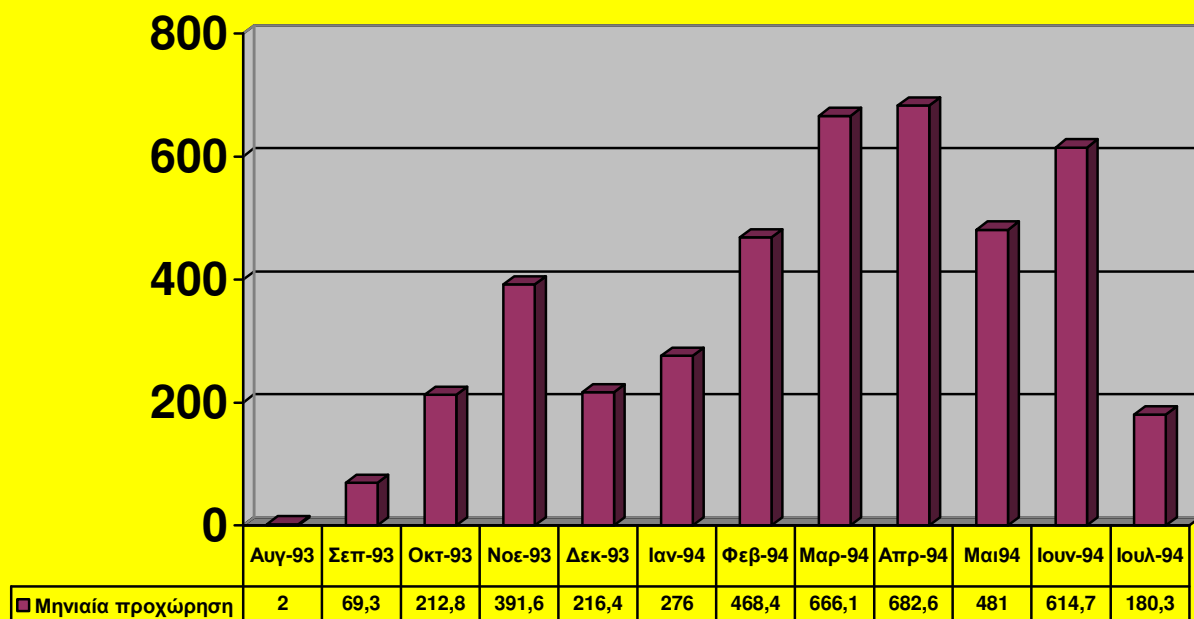
6.1. ΟΙ ΑΠΟΔΟΣΕΙΣ ΤΩΝ ΤΕΣΣΑΡΩΝ TBM

Στο σχήμα 17 α, β, γ και δ παρουσιάζονται οι μηνιαίες προχωρήσεις των 4 TBM

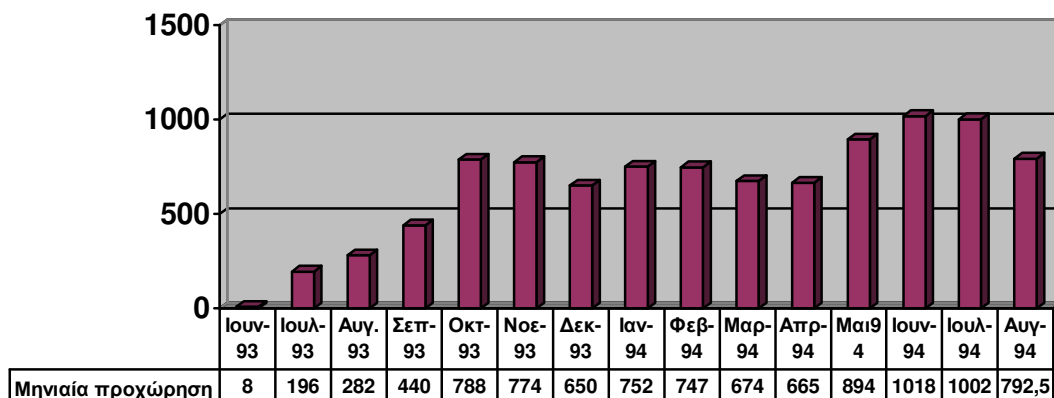
ΤΜΗΜΑ AB1 TBM KATHRIN



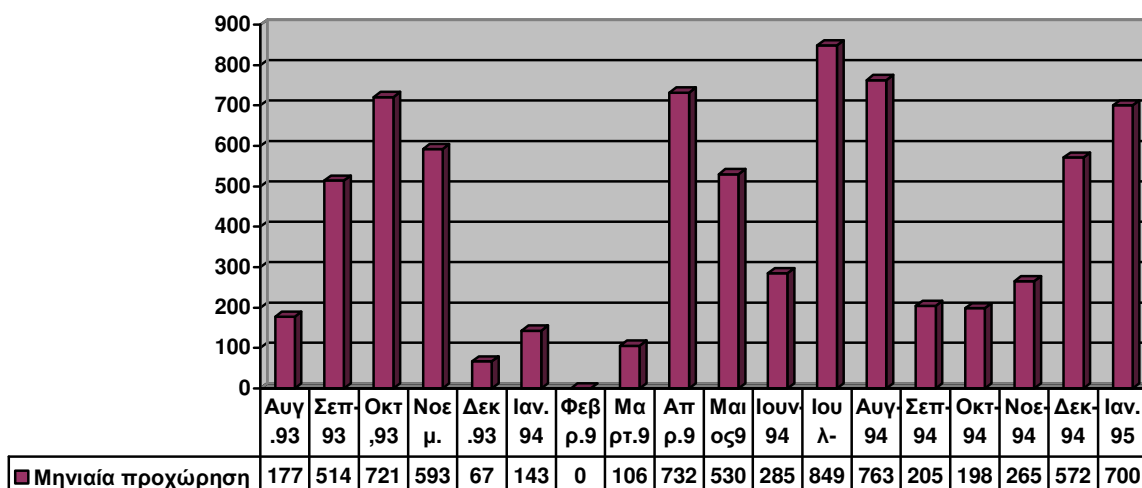
ΤΜΗΜΑ D1E1 TBM NATALIA



ΤΜΗΜΑ B1C TBM SALIMA



ΤΜΗΜΑ CD1 TBM GINEVRA

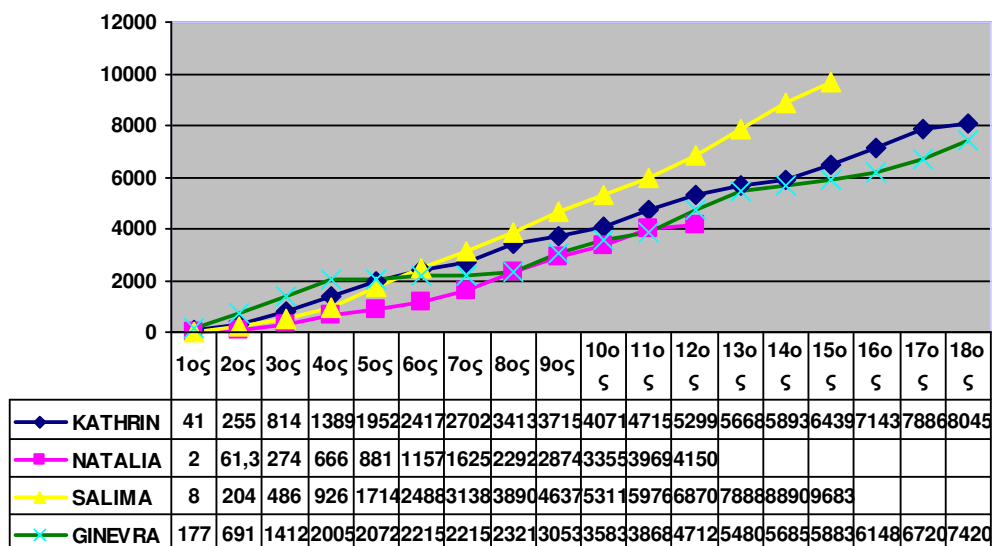


Σχήμα 17: Μηνιαίες προχωρήσεις των τεσσάρων TBM

Στο σχήμα 18 παρουσιάζονται οι αθροιστικές προχωρήσεις των τεσσάρων TBM με βάση τις αναγραφές του σχήματος 17. Σημειώνουμε ότι οι αναγραφές για τα ανοικτού τύπου TBM Kathrin και Natalia αφορούν μόνο την εκσκαφή και αρχική υποστήριξη της σήραγγας. Εάν συνυπολογιστεί και η μόνιμη επένδυση και οι τσιμεντενέσεις (πλήρως περαιωμένη σήραγγα) οι γενικές αποδόσεις ανά ημερολογιακή ημέρα των τεσσάρων TBM διαμορφώνονται ως κατωτέρω:

- TBM Kathrin: 11m/d
- TBM Salima: 23m/d
- TBM Ginevra: 13,7m/d
- TBM Natalia: 8m/d

ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΠΡΟΧΩΡΗΣΗΣ ΤΩΝ 4 TBM



Σχήμα 18: Αθροιστικές προχωρήσεις των τεσσάρων TBM

Στον πίνακα 3 δίνονται οι μέσες προχωρήσεις των τεσσάρων TBM ανά κατηγορία εκσκαφής.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3: ΜΕΣΕΣ ΗΜΕΡΗΣΙΕΣ ΠΡΟΧΩΡΗΣΕΙΣ ΑΝΑ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ (m/d)					
	KAT II	KAT III	KAT IV	KAT V	ΜΗ ΚΑΤΑΤΑΞΙΜΟ
Kathrin	36,4	30,0	24,4	16,9	8,77
Salima	27,2	31,0	28,2	27,3	18,4
Ginevra	23,7	29,2	26,0	25,3	13,0
Natalia	35,3	25,2	22,5	16,3	8,1

6.2. Η ΠΡΟΧΩΡΗΣΗ ΤΩΝ TBM ΣΤΟΥΣ ΜΗ ΚΑΤΑΤΑΞΙΜΟΥΣ ΚΑΤΑ RMR ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥΣ

Στα τμήματα AB1 και D1E1 (ανοικτού τύπου TBM) το ποσοστό των “μη κατατάξιμων κατά RMR” σχηματισμών ανέρχεται σε 8% και 22% αντίστοιχα με συνολικό μέσο όρο και για τα δύο τμήματα 12,97%. Στα τμήματα CB1 και CD1 (TBM διπλής ασπίδας) το ποσοστό αυτό ανέρχεται σε 12% και 26% αντίστοιχα με συνολικό μέσο όρο και για τα δύο τμήματα 17,9%. Το συνολικό ποσοστό των “μη κατατάξιμων κατά RMR” σχηματισμών για το σύνολο της σήραγγας ανέρχεται στο 15,8%. Από το ποσοστό αυτό ένα τμήμα υποστηρίχθηκε με τα προβλεπόμενα για την κατηγορία V μέτρα με πλήρη επιτυχία, ενώ για το υπόλοιπο απαιτήθηκαν ιδιαίτερες προσπάθειες και τροποποίηση των κατασκευαστικών δυνατοτήτων των μηχανημάτων και της κατασκευαστικής αλληλουχίας των μέτρων υποστήριξης για την υπερκέρωση των προβλημάτων.

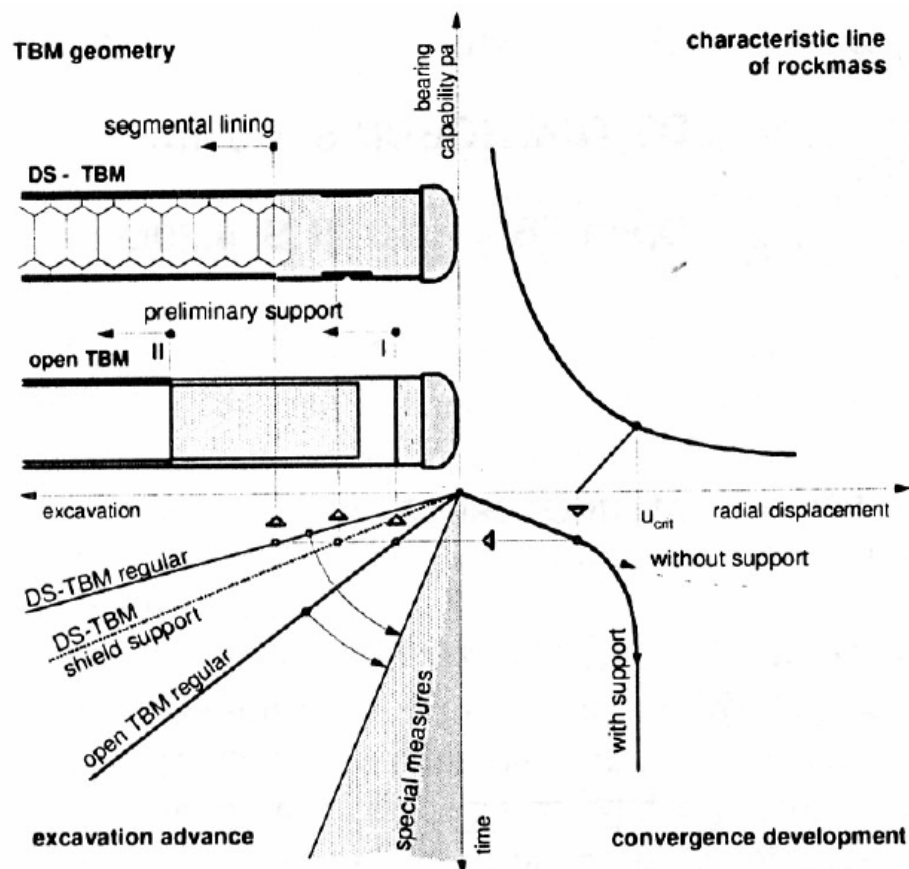
Οι κύριες συμπεριφορές των “μη κατατάξιμων κατά RMR” σχηματισμών που δημιούργησαν τα μεγαλύτερα προβλήματα ήταν αυτές του καταρρέοντος και του συνθλίβοντος υλικού. Να επισημανθεί ότι οι συμπεριφορές αυτές ενίοτε συνυπήρχαν.

6.2.1. ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΣΕ ΣΥΝΘΛΙΒΟΝΤΕΣ (SQUEEZING) ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥΣ

Το φαινόμενο της σύνθλιψης (squeezing) αναφέρεται σε χρονικά συνηρημένες μεγάλης κλίμακας παραμορφώσεις γύρω από την σήραγγα, λόγω της υπερφόρτισης της βραχόμας κατά

την εκσκαφή και μετά από αυτή. Στην μηχανική διάνοιξη των σηράγγων με TBM οι συνθλιβόντες σχηματισμοί αποτελούν ιδιαίτερα σημαντικό πρόβλημα κυρίως για του εξής λόγους:

- Οι μεγάλες παραμορφώσεις μπορούν να οδηγήσουν σε μη αποδεκτή μείωση της διαμέτρου της σήραγγας. Η μη αποδεκτή μείωση αναφέρεται στις απαιτούμενες διαστάσεις για το ίδιο το TBM, το σύστημα υποστήριξης, την αρχική υποστήριξη και την μόνιμη επένδυση.
- Η διάμετρος εκσκαφής με την κοπτική κεφαλή, έχει μικρές δυνατότητες αυξομείωσης, συνεπώς η επιλογή της θα πρέπει να λάβει υπόψη το σύνολο των εκσκαπόμενων σχηματισμών και την βελτιστοποίηση του προκύπτοντος κόστους.
- Η εξέλιξη της αύξησης των παραμορφώσεων (άρα μείωσης της διαμέτρου της σήραγγας) θα πρέπει να μπορεί να εναρμονίζεται με την ταχύτητα προχώρησης του TBM σε συνδυασμό με τις κατασκευαστικές δυνατότητες τοποθέτησης των μέτρων υποστήριξης. Εάν η ταχύτητα προχώρησης του TBM είναι μικρή, δηλαδή η δυνατότητα τοποθέτησης και ενεργοποίησης των μέτρων υποστήριξης καθυστερεί χρονικά τότε υπάρχει έντονη η πιθανότητα το TBM να “κολλήσει” (σχήμα 19).



Σχήμα 19: Σχέση μεταξύ συμπεριφοράς βραχώμαζας και παραμέτρων TBM (Vigl, Jaeger 1997)

A. TBM ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΣΕ ΣΥΝΘΛΙΒΟΝΤΕΣ (SQUEEZING) ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥΣ

Σε περιπτώσεις επικράτησης πηλιτικών μελών, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, παρουσιάστηκε το φαινόμενο της σύνθλιψης τόσο στο τμήμα AB1 όσο και στο τμήμα D1E1. Το φαινόμενο εκδηλώνεται με αυξημένες συγκλίσεις στο τμήμα της κοπτικής κεφαλής, πίσω από την κεφαλή, στην πλατφόρμα εργασίας αλλά και στην ολοκληρωμένη υποστήριξη. Επί πλέον η αστάθεια στο μέτωπο εκσκαφής μειώνει την ταχύτητα προχώρησης του TBM με αποτέλεσμα την

εισαγωγή σε ένα φαύλο κύκλο καθυστερήσεων. Στην εικόνα 11 παρουσιάζεται η εκδήλωση του φαινομένου σε χαοτικό φλύσχη αμέσως μετά την τοποθέτηση του μεταλλικού πλαισίου.



Εικόνα 11: Εκδήλωση σύνθλιψης σε χαοτικό φλύσχη.

Επί τόπου για την αντιμετώπιση αυτής της κατάστασης εφαρμόστηκαν τα προβλεπόμενα μέτρα υποστήριξης της κατηγορίας V και επί πλέον :

- Εφαρμογή του εκτοξευομένου σκυροδέματος αμέσως μετά την κεφαλή (απόσταση περίπου 3m από το μέτωπο) και όχι από την πλατφόρμα εργασίας (απόσταση περίπου 20 m). Σχετική είναι η εικόνα12.



Εικόνα 12: Εφαρμογή εκτοξευομένου σκυροδέματος αμέσως πίσω από την κεφαλή

- Αποξήλωση των κατεστραμμένων μέτρων υποστήριξης (εικόνα 13), χειρωνακτική αποκατάσταση της διατομής και επανατοποθέτηση των μέτρων υποστήριξης.



Εικόνα 13: Κατεστραμμένη υποστήριξη σε συνθλίβοντα σχηματισμό

- Σε περιοχές όπου παρατηρήθηκε ανύψωση του πυθμένα, αποξηλώθηκε το προκατασκευασμένο στοιχείο, τα μεταλλικά πλαίσια έκλεισαν στο δάπεδο τοποθετήθηκε πλέγμα και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και στην αποκατεστημένη διατομή επανατοποθετήθηκε το προκατασκευασμένο στοιχείο (εικόνα 14)



Εικόνα 14: Αποξήλωση του προκατασκευασμένου στοιχείου πυθμένα σε συνθλίβοντα σχηματισμό.

- Πλήρωση με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα όλων των υπερεκσκαφών σε καταρρέοντες σχηματισμούς (εικόνα 15)



Εικόνα 15: Υπερεκσκαφή σε χαοτικό φλύσχη

B. TBM ΔΙΠΛΗΣ ΑΣΠΙΔΑΣ (GINEVRA) ΣΕ ΣΥΝΘΛΙΒΟΝΤΑ Η/ΚΑΙ ΚΑΤΑΡΡΕΟΝΤΑ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ

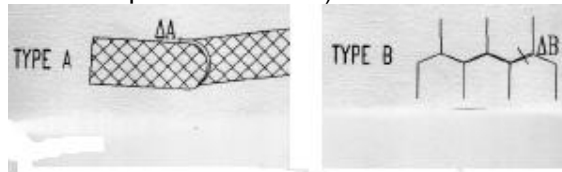
Στο τμήμα της σήραγγας CD1 το TBM GINEVRA συνάντησε σημαντικές δυσκολίες στην διάνοιξη της σήραγγας, διερχόμενο μέσα από τον σχηματισμό του λεπτόκοκκου φλύσχη. Ειδικότερα περί τις Χ.Θ. 5+550 έως 6+150 εμφανίστηκαν εναλλάξ ή/και ταυτόχρονα συμπεριφορές συνθλίβοντος (συγκλίσεις έως και 15 cm) και καταρρέοντος σχηματισμού. Το πρόβλημα επιδείνωνε η υψηλή συγκέντρωση αερίων, η οποία επέβαλε διακοπή των εργασιών όταν οι συγκεντρώσεις υπερέβαιναν τις επιτρεπτές τιμές, με αποτέλεσμα την παραμονή ανυποστήρικτης διατομής για σημαντικά διαστήματα. Τα μέτρα που πρόσθετα υιοθετήθηκαν για την αντιμετώπιση αυτών των δυσκολιών συνίστανται στα εξής:

- Εφαρμογή εκτοξευομένου σκυροδέματος από την ανθρωποθυρίδα της κοπτικής κεφαλής στο μέτωπο εκσκαφής για την σταθεροποίησή του, κάθε 30-80 cm, με αντίστοιχη μείωση του βήματος προχώρησης. Η ύπαρξη ισχυρών τεμαχών ψαμμίτη μέσα στην ιδιαίτερα καταπονημένη πηλτική φάση, δημιουργεί μια ελεύθερη κίνηση αυτών των τεμαχών κατά την περιστροφή της κοπτικής κεφαλής η οποία αποδιοργανώνει περαιτέρω τους πηλίτες και αποσταθεροποιεί το μέτωπο.
- Άμεση πλήρωση των υπερεκσκαφών με τσιμεντένεμα ή εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.
- Χειρωνακτική αποσφήνωση της κοπτικής κεφαλής με πρόσβαση από την ανθρωποθυρίδα και των τηλεσκοπικών ασπίδων από τα ανοίγματά τους.
- Εφαρμογή μέτρων υποστήριξης από τα ανοίγματα της τηλεσκοπικής ασπίδας.
- Εφαρμογή ακραίων πιέσεων για την προώθηση του μηχανήματος στα ήδη τοποθετημένα προκατασκευασμένα στοιχεία της επένδυσης.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η σύνθλιψη και ο χρονισμός τοποθέτησης των προκατασκευασμένων στοιχείων οδηγούσαν στο κλείσιμο του κενού μεταξύ της εκσκαφής και των ασπίδων αρχικά και της επένδυσης όταν αυτή ετοποθετείτο, με αποτέλεσμα την δραματική μείωση της ποσότητας του γαρμπιλιού που εισαγόταν για την πλήρωση αυτού του χώρου. Υπό τις ανωτέρω συνθήκες και την βραχύμαζα σε επαφή με την επένδυση οι τσιμεντενέσεις απλά γεμίζουν κενά, χωρίς την απόληψη της απαραίτητης θετικής δράσης του πρόσθετου δακτυλίου (γαρμπίλι+τσιμεντένεμα) και του ευεργετικού αποτελέσματος των ομογενών περιμετρικών τσιμεντενέσεων που εξισορροπούν το εντατικό πεδίο και γεμίζουν όλα τα κενά των αρμών της επένδυσης.

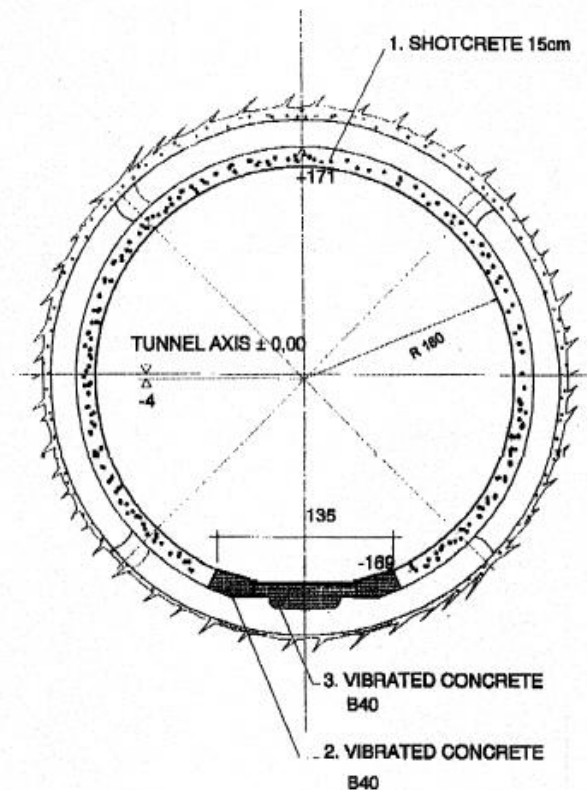
Στις περιπτώσεις αυτές η ποιότητα της απολαμβανόμενης επένδυσης δεν είναι αποδεκτή και συγκρίσιμη με αυτή της υπόλοιπης σήραγγας. Με την πρόοδο της διάνοιξης αυτής της περιοχής της σήραγγας διαπιστώθηκε η παρουσία στα προκατασκευασμένα στοιχεία της επένδυσης ρηγματώσεων, αποκολλήσεις και σπασίματα στις γωνίες και μετατοπίσεις μεταξύ γειτονικών στοιχείων, συνεπώς η ανάγκη ενίσχυσης της φέρουσας ικανότητας της επένδυσης κατέστη πρόδηλος. Για τον υπολογισμό της κατασκευής ενίσχυσης ελήφθησαν υπόψη ιδίως:

- Το ύψος των υπερκειμένων
- Η δομή του σχηματισμού που καταγράφηκε με λεπτομέρεια κατά την διάνοιξη
- Η ποσότητα του γαρμπιλιού που εισήχθη για την πλήρωση του κενού
- Οι ρηγματώσεις των προκατασκευασμένων στοιχείων από την ώθηση του TBM
- Οι ρηγματώσεις των προκατασκευασμένων στοιχείων που προκλήθηκαν σε μεταγενέστερα στάδια
- Ελαττώματα της επένδυσης και ιδιαίτερα ανοίγματα αρμών κ.λ.π. (σχήμα 20 ΔΑ και ΔΒ περίπου 30-35mm)



Σχήμα 20: Ελαττώματα στην τοποθέτηση των προκατασκευασμένων στοιχείων

Η επιλογή για την ενίσχυση της επένδυσης τελικά ήταν η κατασκευή ενός δακτυλίου από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα σύμφωνα με το σχήμα 21. Η επιφάνεια της επένδυσης καθαρίστηκε και για την επίτευξη ικανής συνάφειας έγινε επεξεργασία της με αμμοβολή. Σε ότι αφορά την επίδραση στην παροχетеυτική ικανότητα της σήραγγας η νέα ανάλυση για την περιοχή της ενίσχυσης έλαβε υπόψη $k_{st}=65$ και μείωση της διατομής στα 3,2m, με αποτέλεσμα την αύξηση των υδραυλικών απωλειών στην παροχή σχεδιασμού των 26m³/sec από 44,39 σε 44,89m γεγονός που δεν είχε ουσιαστική επίπτωση στην παροχетеυτική ικανότητα της σήραγγας.

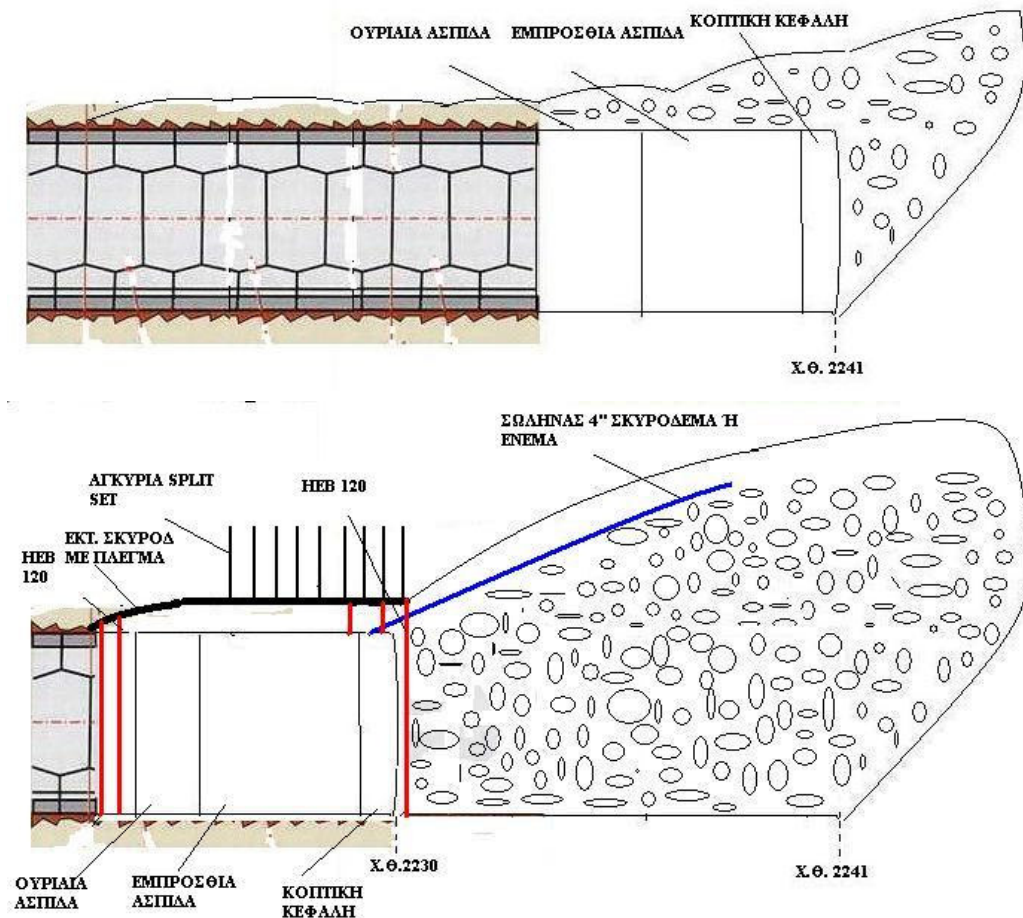


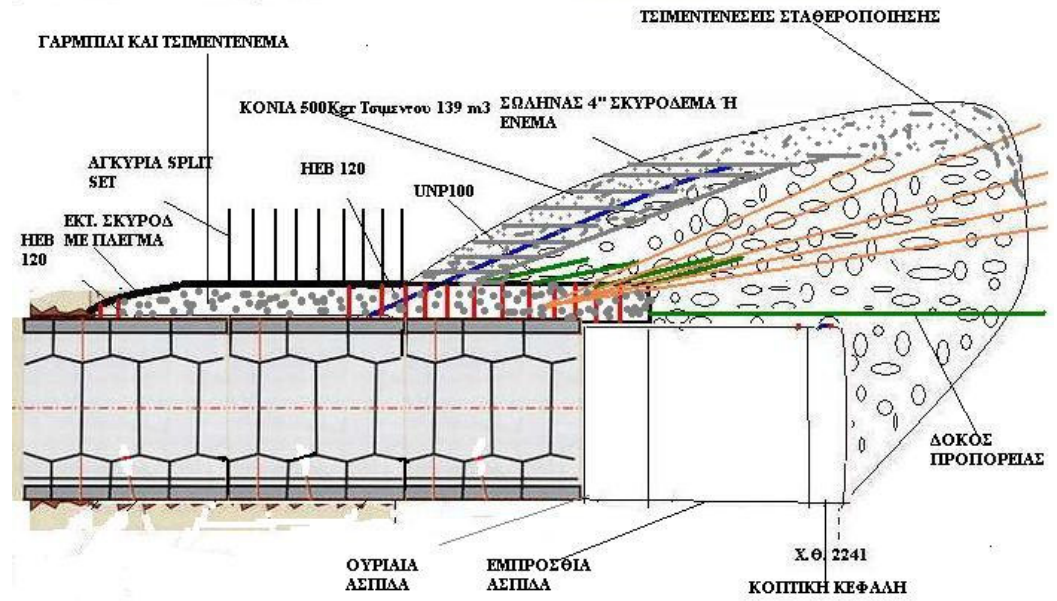
Σχήμα 21: Ενίσχυση επένδυσης με προκατασκευασμένα στοιχεία

Γ. ΤΒΜ ΔΙΠΛΗΣ ΑΣΠΙΔΑΣ (GINEVRA) ΣΕ ΚΑΤΑΡΡΕΟΝΤΑ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ

Το ΤΒΜ GINEVRA από την Χ.Θ. 2+040 συνάντησε μια πλήρως αποδιοργανωμένη περιοχή το κύριο χαρακτηριστικό της οποίας ήταν η παρουσία ισχυρών τεμαχών ψαμμίτη μέσα σε υλικό διατμημένου πηλίτη που προσομοίαζε με πολύ μικρής συνοχής αργιλικό υλικό. Όπως αναφέραμε και παραπάνω η ύπαρξη ισχυρών τεμαχών ψαμμίτη μέσα στην ιδιαίτερα καταπονημένη πηλινική φάση, δημιουργεί μια ελεύθερη κίνηση αυτών των τεμαχών κατά την περιστροφή της κοπτικής κεφαλής η οποία αποδιοργανώνει περαιτέρω τους πηλίτες και αποσταθεροποιεί το μέτωπο, με αποτέλεσμα το καταρρέον υλικό να παρασύρεται από το σύστημα φόρτωσης αφήνοντας μεγάλα κενά στο μέτωπο αλλά και πίσω από αυτό. Μετά από την Χ.Θ. 2+097 και έως την Χ.Θ. 2+240 το πρόβλημα έδειξε σταδιακά να επιδεινώνεται, με φρακάρисματα του μηχανήματος από κατακρημνίσεις στην περιοχή της ασπίδας. Η αποσφήνωση του μηχανήματος τόσο στην κεφαλή όσο και στις ασπίδες γινόταν χειρωνακτικά και η όποια προχώρηση απαιτούσε ισχυρή προώθηση στην ήδη τοποθετημένη επένδυση. Περί την Χ.Θ. 2+241 η υπερεκσκαφή έγινε ανεξέλεγκτη και το φρακάρισμα του ΤΒΜ οριστικό. Για την αποκατάσταση της ευστάθειας της σήραγγας και την αποσφήνωση του ΤΒΜ ανελήφθησαν περίπου επί περίπου δύο μήνες μία σειρά δράσεων οι οποίες σε μία γενική περιγραφή είναι οι παρακάτω:

Υποχώρηση του ΤΒΜ με απομάκρυνση τμήματος της κατασκευασμένης επένδυσης, εκσκαφή στοάς "by pass" στο πάνω μέρος της ασπίδας του ΤΒΜ (εικόνα 16), εφαρμογή εκτοξευομένου σκυροδέματος σε όλη την επιφάνεια εκσκαφής, υποστήριξη της εκσκαφής με αγκύρια και μεταλλικά πλαίσια HEB 120, εφαρμογή δοκών προτορείας, πλήρωση του κενού της κατακρημνίσης με κονία, εκτάλεση τσιμεντενέσεων σταθεροποίησης μέσα από την στοά "by pass". Στο σχήμα 22 δίνεται σε μορφή σκίτσων η αλληλουχία των εργασιών αυτών.





38



Εικόνα 16: Η στοά “by pass” πάνω από την ασπίδα του TBM.

7. ΣΥΝΟΨΗ – ΕΜΠΕΙΡΙΑ ΠΟΥ ΑΠΟΚΤΗΘΗΚΕ

Η σήραγγα Ευήνου Μόρνου τέθηκε σε λειτουργία την 8 Απριλίου 1995, είκοσι επτά μήνες μετά την έναρξη λειτουργίας του πρώτου TBM, γεγονός που αποτελεί ένα σημαντικό επίτευγμα όλων των εμπλεκομένων μερών στην μελέτη και υλοποίηση του έργου. Για να γίνει αυτό ήταν καθοριστικής σημασίας:

- Η πρόταση για τις μνημονευθείσες μεθόδους κατασκευής και η αποδοχή αυτών με την επικράτηση “καινοτομικού” πνεύματος, καθώς οι συγκεκριμένες μέθοδοι την χρονική εκείνη στιγμή δεν είχαν την έκταση εφαρμογής που απέκτησαν στην συνέχεια.
- Η υψηλή επαγγελματική επάρκεια του συνόλου των απασχοληθέντων στην μελέτη και κατασκευή της σήραγγας.

Με δεδομένη την σχετικά περιορισμένη, μέχρι τότε, έκταση εφαρμογής κάποιων από τις χρησιμοποιηθείσες μεθόδους σημαντικά συμπεράσματα εξήχθησαν και ενσωματώθηκαν στην διεθνή τεχνογνωσία και πρακτική:

- ✓ Τα TBM με διπλή τηλεσκοπική ασπίδα είναι μηχανές διάνοιξης σε “σκληρές βραχώμαζες” με διευρυμένο πεδίο εφαρμογής σε ασταθείς σχηματισμούς. Σε κάθε έργο απαιτείται μία διαδικασία βελτιστοποίησης της διεύρυνσης αυτής των δυνατοτήτων του μηχανήματος σε σχέση με τις πιθανές μειώσεις απόδοσης στους “καλούς” σχηματισμούς, που αποτελούν το κύριο πεδίο εφαρμογής του.
- ✓ Και τα τέσσερα TBM απέδειξαν την εφαρμοσιμότητα της μεθόδου μηχανικής διάνοιξης σε σχηματισμούς κατηγοριών II έως V. Για σχηματισμούς μη κατατάξιμους κατά RMR απαιτείται η εφαρμογή κάποιων ειδικών μεθόδων (με αντίτιμο την μείωση των αποδόσεων)

- ✓ Οι αποδόσεις των ανοικτού τύπου TBM βαίνουν μειούμενες από την κατηγορία II προς την κατηγορία V, στην οποία είναι περίπου οι μισές από αυτές της κατηγορίας II,
- ✓ Οι αποδόσεις των TBM με διπλή τηλεσκοπική ασπίδα είναι σχεδόν σταθερές για όλες τις κατηγορίες κατά RMR
- ✓ Οι αποδόσεις των TBM με διπλή τηλεσκοπική ασπίδα είναι γενικά μεγαλύτερες από τις αποδόσεις των ανοικτού τύπου TBM. Μόνο σε σχηματισμούς κατηγορίας II, οι αποδόσεις διάνοιξης των ανοικτού τύπου TBM είναι μεγαλύτερες από αυτές των TBM με διπλή τηλεσκοπική ασπίδα (και απολύτως ισοδύναμες αν συνυπολογιστεί και η απαίτηση κατασκευής της μόνιμης επένδυσης).
- ✓ Το κύριο χαρακτηριστικό πλεονέκτημα των ανοικτού τύπου TBM είναι η δυνατότητα εφαρμογής μέτρων υποστήριξης αρκετά κοντά στο μέτωπο εκσκαφής. Το πλεονέκτημα αυτό μπορεί να επεκταθεί και να γίνει ουσιαστικότερο αν ενταχθεί στις “κανονικές” λειτουργίες του TBM η εφαρμογή εκτοξευομένου σκυροδέματος κοντά στο μέτωπο.
- ✓ Όπως διαπιστώθηκε (κυρίως με το διπλής ασπίδας TBM Ginevra) η ύπαρξη ισχυρών τεμαχών που “αιωρούνται” μέσα σε χαμηλών χαρακτηριστικών σχηματισμό, δημιουργεί κατά την περιστροφή της κοπτικής κεφαλής μια ελεύθερη κίνηση αυτών των τεμαχών, η οποία αποσταθεροποιεί το μέτωπο, οδηγώντας σε μεγάλες έως ανεξέλεγκτες υπερεκσκαφές. Στις περιπτώσεις αυτές θα πρέπει να εξασφαλίζεται η δυνατότητα επέμβασης στο μέτωπο εκσκαφής μέσω ειδικά σχεδιασμένων θυρίδων για εφαρμογή εκτοξευομένου σκυροδέματος, αγκυρίων, τσιμεντενέσεων ή άλλων τεχνικών βελτίωσης της βραχύμαζας. Επίσης είναι επιθυμητή η δυνατότητα συνεχούς ρύθμισης της ταχύτητας περιστροφής της κοπτικής κεφαλής και της απολαμβανόμενης ροπής.
- ✓ Ο επί μέρους σχεδιασμός των TBM, ιδιαίτερα σε ότι αφορά την διαρρύθμιση της κοπτικής κεφαλής, θα πρέπει να γίνεται για κάθε έργο ξεχωριστά και να εξασφαλίζει την δυνατότητα κάποιων ελάχιστων μετατροπών και τροποποιήσεων κυρίως στην διάταξη αποκομιδής των προϊόντων εκσκαφής.
- ✓ Όπως σημειώνουν και οι Barla & Pelizza είναι απαραίτητο η κοπτική κεφαλή να προεξέχει από την εμπρόσθια ασπίδα όσο το δυνατόν λιγότερο, για να επιτυγχάνεται υποστήριξη όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο μέτωπο.
- ✓ Το TBM θα πρέπει να διαθέτει επαρκές απόθεμα ισχύος προώθησης, ώστε να μπορεί να αυξήσει την ταχύτητα προώθησης για να διασχίσει συνθλίβοντες σχηματισμούς.
- ✓ Η νέα τεχνολογία μπορεί να συνεισφέρει στην εξοικονόμηση χώρων στα διάφορα συστήματα του TBM, αυξάνοντας την λειτουργικότητα των μηχανημάτων.
- ✓ Κάποιες φορές παρατηρήθηκαν ανεπανόρθωτες βλάβες στους συμπλέκτες και το σύστημα μετάδοσης της κίνησης του TBM (Natalia 6-4-1994) εξ αιτίας πτώσεων τάσεως του ηλεκτρικού ρεύματος και ενώ το μηχάνημα βρισκόταν σε φάση εκσκαφής. Μια πλέον αποτελεσματική προστασία αυτών των συστημάτων είναι απαραίτητη.
- ✓ Ανάλογα με τις υιοθετούμενες παραδοχές είναι δυνατόν να προκύψουν ιδιαίτερα αποκλίνοντα αποτελέσματα στην μορφή και τον χαρακτήρα της μόνιμης επένδυσης. Στο βαθμό που η μόνιμη επένδυση προσομοιώνεται σαν μια διακριτή φέρουσα κατασκευή φορτιζόμενη από την βραχύμαζα, τότε η παρουσία του οπλισμού είναι μάλλον αναπόφευκτη για να καλύψει τις εισαγόμενες ροπές και εφελκυστικές τάσεις. Υπό την θεώρηση της μόνιμης επένδυσης ως ένα συστατικό ενός συνολικού “σύμμικτου” φέροντος συστήματος που αποτελείται από την περιβάλλουσα βραχύμαζα, την αρχική υποστήριξη, την μόνιμη επένδυση και τις τσιμεντενέσεις, η παρουσία οπλισμού στην επένδυση δεν συνεισφέρει αντίθετα επιβαρύνει την κατασκευή της σε κόστος, χρόνο και απολαμβανόμενη ποιότητα. Τελικά η σύγκριση άοπλης και οπλισμένης μόνιμης επένδυσης καταλήγει στην συνολική σύγκριση της επιλογής τοποθέτησης οπλισμού και την εκτέλεση του απαιτούμενου προγράμματος τσιμεντενέσεων.

Βιβλιογραφικές αναφορές:

1. *Η εγκεκριμένη μελέτη του έργου.*
2. *Τα ημερολόγια και επιμετρητικά στοιχεία του έργου.*

3. Grantori R, Jaeger M, Antonini F, Vigl L, Evinos-Mornos tunnel – Greece. Construction of a 30Km long hydraulic tunnel in less than three years under the most adverse geological conditions. *Proceedings of RETC 1995* pp747-767
4. Vigl L, Jaeger M, Double shield TBM and Open TBM in squeezing rock. – A comparison in Tunnel for People 1997 Golser, Hinkel & Schubert eds Balkema ISBN 9054108681.
5. Innerhofer G, Vigl L.. Tunnel lining without reinforcement in Tunnel for People 1997 Golser, Hinkel & Schubert eds Balkema ISBN 9054108681
6. Vigl L, Purer E, Mono-shell segmental lining for pressure tunnels, in Tunnel for People 1997 Golser, Hinkel & Schubert eds Balkema ISBN 9054108681
7. Grantori R, Antonini F, Double Shield TBM Excavation Technique, Recent experiences and future development, in Felsbau 12 (1994) Nr 6.
8. Bieniawski Z. T. An Assessment of ground conditions and rock mass classifications at the Evinos-Mornos tunnel, Report February 20, 1995
9. Μαρίνος Π, Επί των γεωλογικών συνθηκών και της γεωτεχνικής συμπεριφοράς των σχιστοκερατολίθων που διέσχισε η σήραγγα Ευήνου Μόρνου μεταξύ 2330-2880m από την είσοδο Αγίου Δημητρίου. Έκθεση Συμβούλου Οκτώβριος 1993.
10. Μαρίνος Π, Έκθεση επί της γεωλογικής καταστάσεως του φλύσχη στη σήραγγα Ευήνου Μόρνου στο τμήμα Τερψιθέας προς Κόκκινο, Νοέμβριος 1994.
11. Pelizza S, Mahtab A, Evinos Project. Rock classification for squeezing and running ground. A consultants' Report 13-July-1994
12. Vigl L, Honeycomp segmental tunnel linings – simple, economical, successful in Felsbau 18 (2000), No 6.
13. Giovanni Barla, Sebastiano Pelizza, TBM tunnelling in difficult ground conditions 2000, GeoEng 2000, Melbourne