



Πρόσφατες εμπειρίες απο την μηχανική διάνοιξη σηράγγων στο ΜΕΤΡΟ της ΑΘΗΝΑΣ

Νικόλαος Ζ. Μπούσουλας
Πολιτικός Μηχανικός – Γεωτεχνικός, MSc.
Προϊστάμενος Τμήματος Γεωτεχνικών Μελετών
ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΑΕ

ΗΜΕΡΙΔΑ ΕΕΣΥΕ - 01/02/2007



A. ΣΥΝΤΟΜΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

ΗΜΕΡΙΔΑ ΕΕΣΥΕ - 01/02/2007



ΕΡΓΑ ΣΕ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ

- Βασικό Έργο

(Εθν. Άμυνα – Κεραμικός & Σεπόλια – Δάφνη)

- Επέκταση Σεπόλια - Αγ. Αντώνιος

- Επέκταση Δάφνη – Αγ. Δημήτριος

- Επέκταση Εθν. Άμυνα – Δ. Πλακειντίας –
Αεροδρόμιο

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

ΛΕΙΤΟΥΡΓΟΥΣΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ

- ΓΡΑΜΜΗ 1, ΗΣΑΠ
- ΓΡΑΜΜΗ 2, ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ
- ΓΡΑΜΜΗ 3, ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ

ΣΤΑΘΜΟΣ ΜΕΤΡΟ

ΣΤΑΘΜΟΣ ΜΕΤΡΟ, ΥΠΟ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ
Εξασφαλισμένη Χρηματοδότηση

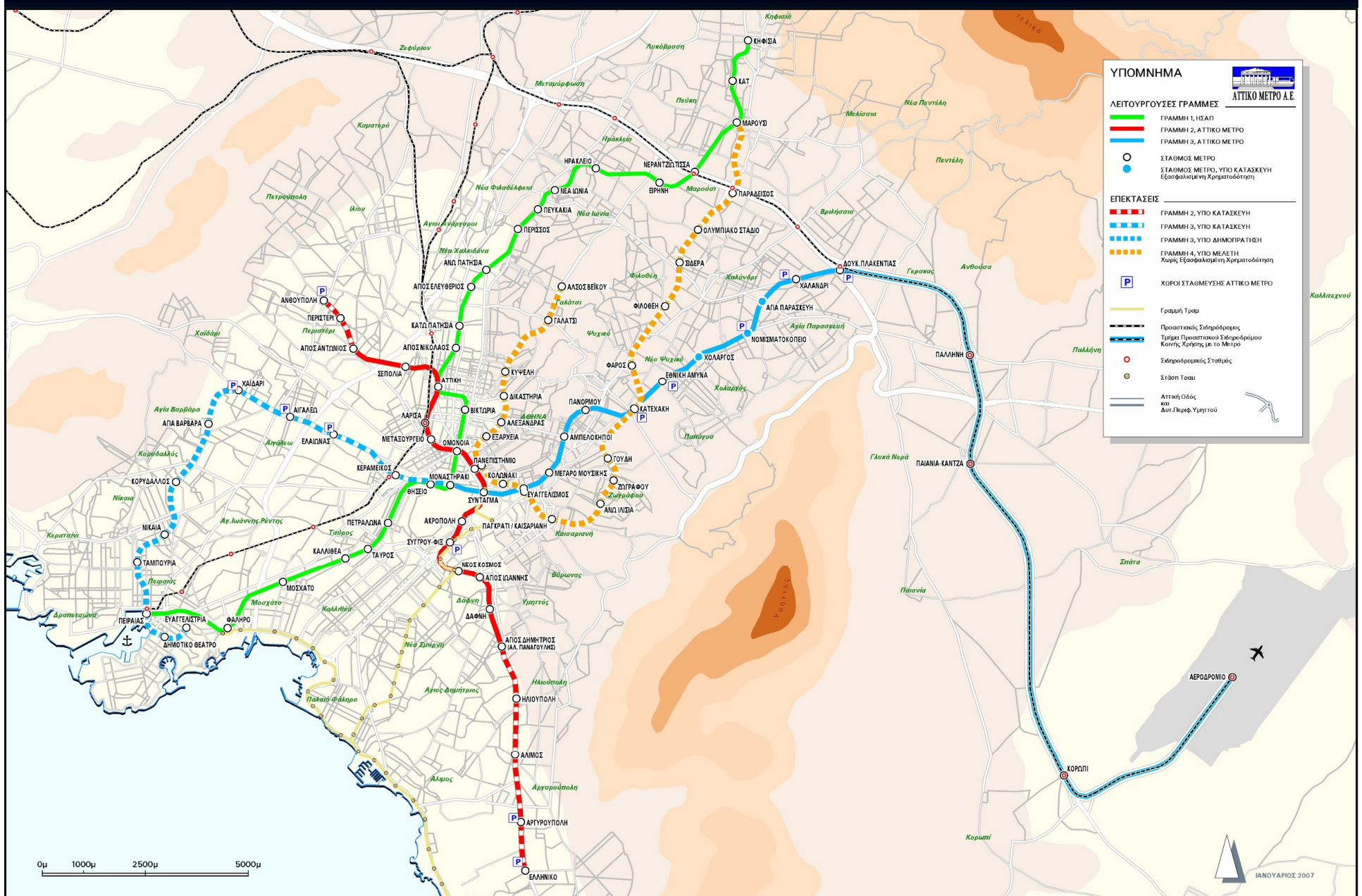
ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

- ΓΡΑΜΜΗ 2, ΥΠΟ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ
- ΓΡΑΜΜΗ 3, ΥΠΟ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ
- ΓΡΑΜΜΗ 3, ΥΠΟ ΔΗΜΟΓΡΑΤΗΣΗ
- ΓΡΑΜΜΗ 4, ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ
Χωρίς Εξασφαλισμένη Χρηματοδότηση

ΧΩΡΟΣ ΣΤΑΘΜΕΥΣΗΣ ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ

- Γραμμή Τραμ
- Προαστιακός Σιδηρόδρομος
- Τμήμα Προαστιακού Σιδηρόδρομου Κοινής Χρήσης με το Μετρό
- Σιδηροδρομικός Σταθμός και
- Σταθμό Τραμ
- Αττική Οδός
- Διτ. Περιφ. Υψητού

ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε.



ΣΧΕΔΙΟ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΡΟ ΑΘΗΝΑΣ

ΤΟ ΕΡΓΟ ΣΥΓΧΡΗΜΑΤΟΔΟΤΕΙΤΑΙ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΕΝΩΣΗ

Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε.

ΗΜΕΡΙΔΑ ΕΕΣΥΕ - 01/02/2007

ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2007

Α! ΦΑΣΗ ΕΠΕΚΤΑΣΕΩΝ (έως 2007- 8)

- Επέκταση Μοναστηράκι - Αιγάλεω
- Επέκταση Αγ. Αντώνιος – Περιστέρι - Ανθούπολη
- Χολαργός – Νομισματοκοπείο – Αγ. Παρασκευή

Β! ΦΑΣΗ ΕΠΕΚΤΑΣΕΩΝ (έως 2009)

- Επέκταση Αιγάλεω – Χαϊδάρι & Αμαξοστάσιο Ελαιώνα
- Επέκταση Αγ. Δημήτριος - Ελληνικό

■ Β! ΦΑΣΗ ΕΠΕΚΤΑΣΕΩΝ (έως 2012)

- Επέκταση Χαϊδάρι – Πειραιάς - Ευαγγελίστρια

ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΒΑΣΙΚΟΥ ΕΡΓΟΥ

Δύο Μηχανήματα ολομέτωπης διάνοιξης
σηράγγων με Ασπίδα (TBM)



Διάνοιξη με συμβατικά μηχανικά μέσα

Μέθοδος ανοικτού ορύγματος



Μηχάνημα σημειακής κοπής (OFS)



Β. ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ 3

Τμήμα: Εθνική Άμυνα – Δ. Πλακεντίας

ΗΜΕΡΙΔΑ ΕΕΣΥΕ - 01/02/2007



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή
2. Επιλογή μεθόδου διάνοιξης
3. Μηχάνημα ολομέτωπης κοπής ΕΡΒ
4. Γεωλογικές – γεωτεχνικές συνθήκες έργου
5. Ημερομηνίες ορόσημα – φωτογραφίες του Έργου
6. Ορισμένες αναλύσεις αποτελεσμάτων εισιαφής ΕΡΒ
7. Θέματα σχεδιασμού
8. Συμπεράσματα – Προοπτικές

1. Εισαγωγή

ΗΜΕΡΙΔΑ ΕΕΣΥΕ - 01/02/2007



Χάρτης Επέκτασης της Γραμμής 3 του ΜΕΤΡΟ της Αθήνας



Η επέκταση Εθνική Άμυνα - Δ. Πλακεντίας - Αεροδρόμιο αποτελεί τμήμα της Γραμμής 3 του Μετρό της Αθήνας, το μεγαλύτερο τμήμα της οποίας (σε μήκος 5,9χλμ.) είναι υπόγειο.

Η έγκαιρη διάνοιξη της σήραγγας, για την σύνδεση με το ΜΕΤΡΟ της Αθήνας με το Διεθνές αεροδρόμιο Ε. Βενιζέλος, ήταν επιβεβλημένη λόγω των Ολυμπιακών αγώνων της Αθήνας του 2004



Γενική Γεωλογία περιοχής Έργων

Πρόσφατες αποθέσεις: τεταρτογενή εδάφη, που αποτελούνται κυρίως από αμμώδεις αργίλους και περάσματα αργιλωδών – ιλυωδών άμμων και χαλίκων.

Κορήματα: αποτελούνται από αργιλώδεις – ιλυώδεις χάλικες και ιλυώδεις άμμους που επικάθονται σε τσιμεντοποιημένο λατυποπαγές.

Ποτάμιες αποθέσεις Ανωτέρου Τριτογενούς: αυτές οι αποθέσεις αποτελούνται από ερυθρές – καστανές αμμώδεις αργίλους με λεπτούς χάλικες και πisolίθους και ενδιαστρώσεις αμμωδών/χαλικωδών περασμάτων, κροιαλοπαγών και αργιολίθων.

Κρητιδικό βραχώδες υπόβαθρο: το υπόβαθρο αποτελείται από τον «Αθηναϊκό Σχιστόλιθο»: ο σχηματισμός αυτός στην περιοχή του έργου αντιπροσωπεύεται ουσιαστικά από α) έναν ανώτερο ορίζοντα που αποτελείται από κροιαλοπαγή σε εναλλαγές με αργιολίθους και ψαμμίτες και β) γκρίζο, λεπτοστρωματώδη ως μεσοστρωματώδη, ασθενή ως μέτρια ισχυρό, μέτρια ως έντονα αποσαθρωμένο μεταψαμμίτη και μεταιλύολιθο, τοπικά ισχυρά διατμημένο ή κατακειλασμένο (breccia).

Κατηγορίες βασικών γεωυλικών

- Τεχνητές επιχώσεις
- Αθηναϊκός Σχιστόλιθος (Μεταψαμμίτης – μεταϊλυόλιθος, με ποικίλο βαθμό αποσάθρωσης και διάβρωσης)
- Κροικαλοπαγή (με μεταβλητό βαθμό σιμεντώσης και χαλαρότητας)
- Στιφρές έως σκληρές άργιλοι-ιλύες με μεταβλητό ποσοστό άμμου και χαλίκων, κατά περιοχές ιλυώδης/αργιλώδης άμμος (τοπικά σιμεντωμένο)

Υδρογεωλογικές συνθήκες

- Οι συνθήκες του υπογείου ύδατος κατά μήκος ολοκλήρου του έργου χαρακτηρίζονται από έναν συνεχόμενο υδροφόρο ορίζοντα.
- Το υπόβαθρο του «Αθηναϊκού Σχιστόλιθου» μπορεί υδρογεωλογικώς να περιγραφεί γενικώς σαν μόλις ελαφρώς περατό με τιμές $k < 10^{-6} \text{ m/s}$. Πιθανόν να υπάρχουν και στρώματα με υψηλότερες περατότητες.
- Σημείωση: Οι εδαφικοί σχηματισμοί της περιοχής είναι ομοίως ελαφρώς περατοί με μετροημένες διαπερατότητες στις γεωτρήσεις να κυμαίνονται μεταξύ $10^{-6} - 10^{-7} \text{ m/s}$. Τοπικά υπάρχουν στρώματα υψηλότερης περατότητας (αμμώδεις ή χαλικώδεις θύλακες).

Βασικά χαρακτηριστικά της σήραγγας

- Μήκος: 3374μ
- Ελάχιστη ακτίνα ευθυγράμμισης: 300μ οριζόντια και 2500μ κατακόρυφα
- Ελάχιστη ακτίνα εισιαφής σήραγγας: 250μ
- Μέγιστο όριο κλίσης: $\pm 4\%$
- Εξωτερική διάμετρος εισιαφής: 9.490μ
- Εσωτερική διάμετρος επένδυσης: 8.480μ
- Υπερκείμενο της ασπίδας: 9μ-17μ

Μέθοδοι κατασκευής

Μηχάνημα ολομέτωπης διάνοιξης σηράγγων με ασπίδα εξισορρόπησης της πίεσης εδάφους (EPB), μήκος σήραγγας 3.4 km



Διάνοιξη με συμβατικά μηχανικά μέσα



Μέθοδος ανοικτού ορύγματος

2. Επιλογή μεθόδου διάνοιξης

ΗΜΕΡΙΔΑ ΕΕΣΥΕ - 01/02/2007



Διακριτές περιοχές βάσει της γεωλογίας

Περιοχή 1 (Χ.Θ. 12+620 έως Χ.Θ. 13+100)

Αργιλικά υλικά και δευτερευόντως κροκαλοπαγή

Περιοχή 2 (Χ.Θ. 13+100 έως Χ.Θ. 14+070)

Αθηναϊκός σχιστόλιθος

Περιοχή 3 (Χ.Θ. 14+070 έως Χ.Θ. 15+050)

Κροκαλοπαγή, Αθηναϊκός σχιστόλιθος και αργιλικά υλικά

Περιοχή 4 (Χ.Θ. 15+050 έως Χ.Θ. 17+050)

Στιφρές έως σκληρές χαλικώδεις άργιλοι-ιλύες και κατά θέσεις κροκαλοπαγή

Γεωτεχνικές πληροφορίες για την επιλογή των μηχανών διάνοιξης σήραγγων (1/2)

- Γεωλογική μηκοτομή με τις θέσεις των γεωτρήσεων, την στάθμη του Υ.Υ.Ο και την θέση της σήραγγας
- Οριζοντιογραφία με τις θέσεις των γεωτρήσεων, την θέση της σήραγγας
- Στοιχεία εδαφικών γεωυλικών
 - Κοινομετρικές καμπύλες
 - Διατμητική αντοχή
 - Ενεργός και αστραγγιστή συνοχή
 - Διαπερατότητα
- Ποσοστό χαλαζία

συνεχίζεται...

Γεωτεχνικές πληροφορίες για την επιλογή των μηχανών διάνοιξης σήραγγων (2/2)

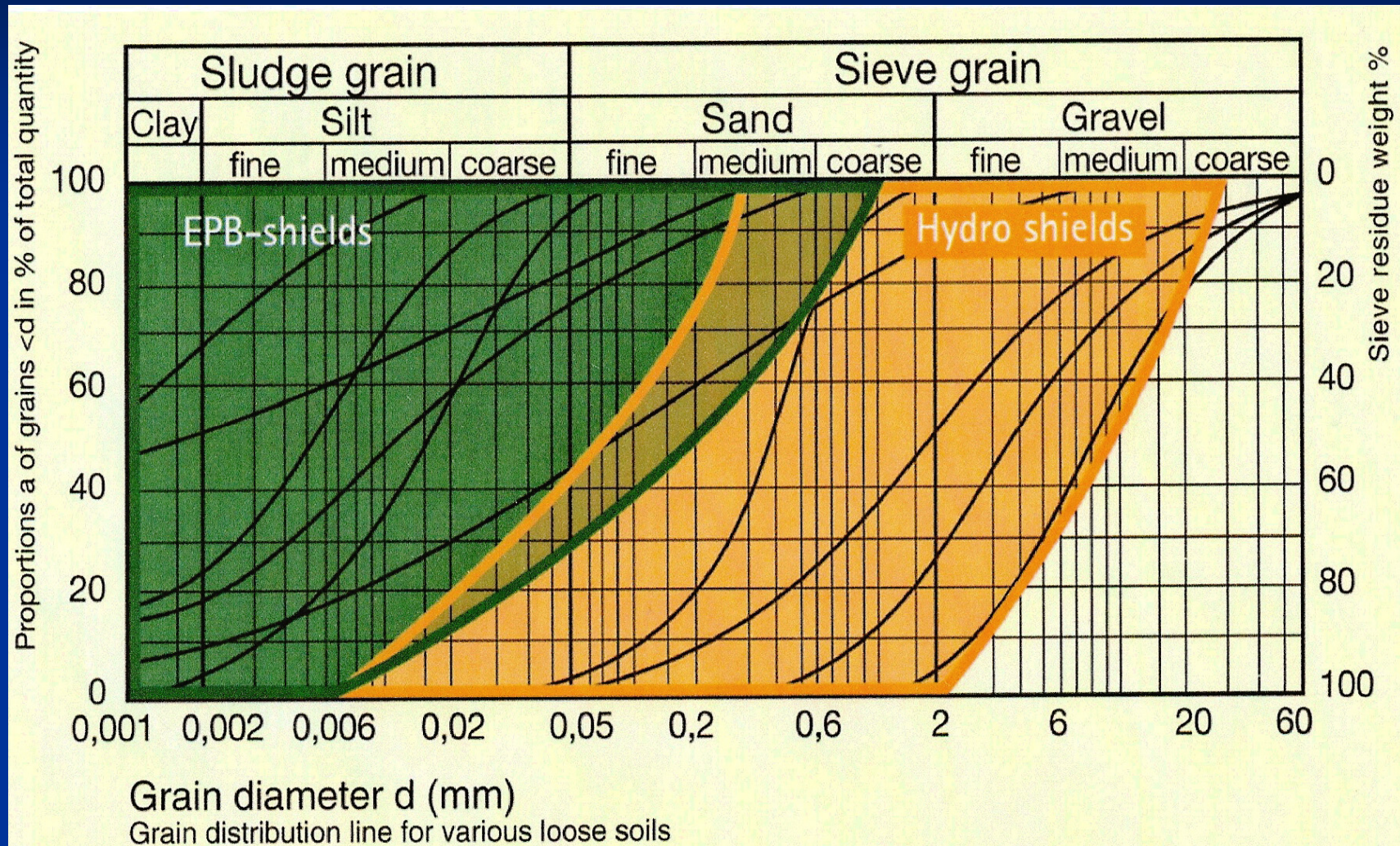
- Για τα λεπτόκοκκο επιπέον
 - Όρια Atterberg, PL, LL, WL. Ic, PI
 - Τύπος αργίλου
- Πιθανή ύπαρξη ογκολίθων: τύπος πετρώματος, αναμενόμενο ποσοστό, αναμενόμενο μέγεθος, μονοαξονική αντοχή, ποσοστό χαλαζία
- Πιθανή ύπαρξη στρώσεων πετρώματος: τύπος και ποιότητα πετρώματος, RQD, μονοαξονική και εφελκυστική αντοχή, ποσοστό χαλαζία
- Μητρώα γεωτρήσεων
- Μέγιστη / ελάχιστη επικάλυψη σήραγγας

Πλεονεκτήματα διάνοιξης σήραγγας με μηχανή ολομέτωπης κοπής TBM σε σχέση με συμβατικά μηχανικά μέσα

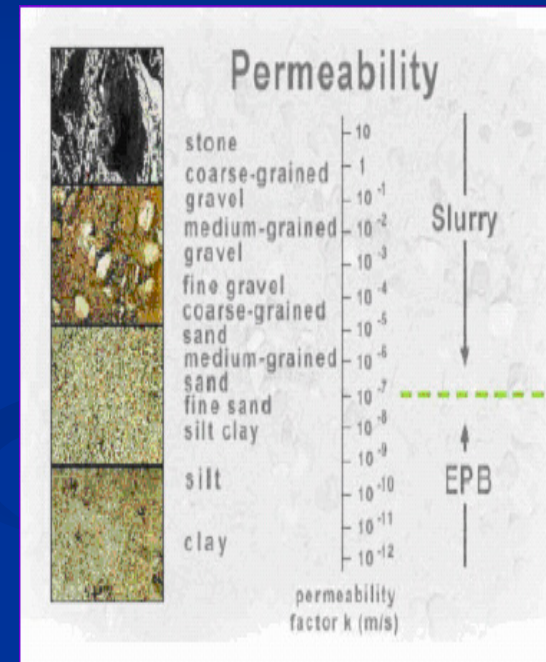
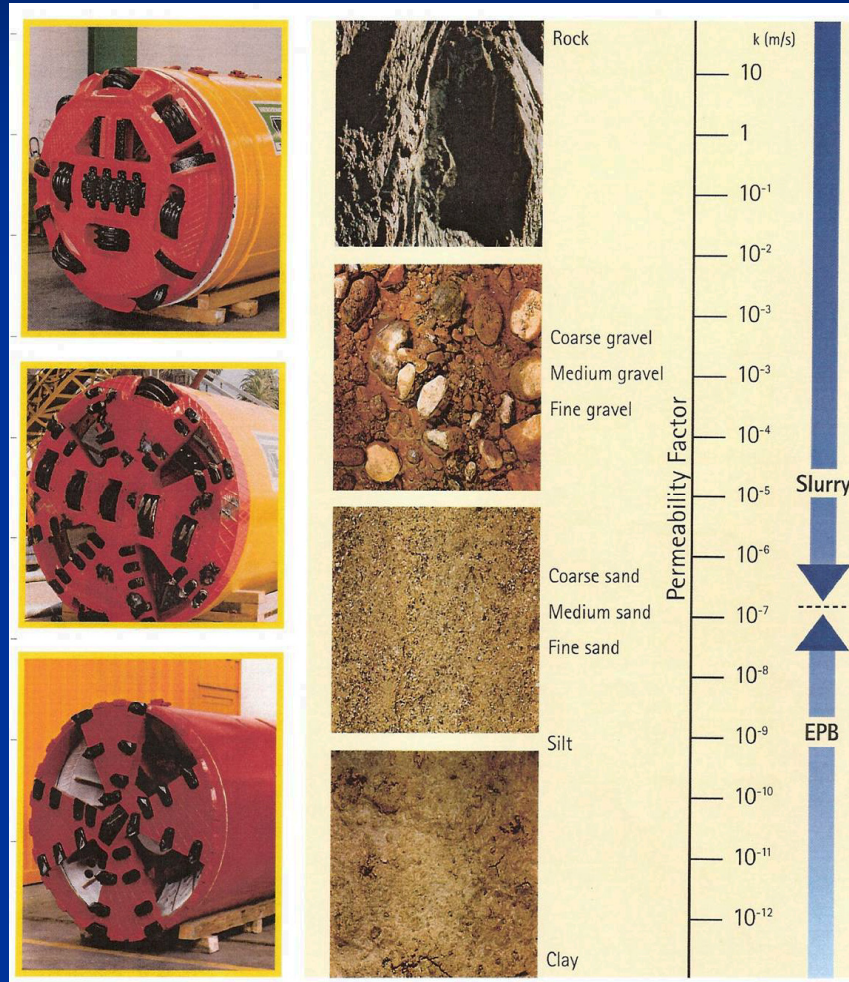
Για μήκος σήραγγας περίπου 3375m:

1. μείωση του απαιτούμενου χρόνου κατασκευής λόγω των Ολυμπιακών αγώνων της Αθήνας του 2004
2. ελαχιστοποίηση της όχλησης στην επιφάνεια
3. γρήγορη πρόοδος διάνοιξης σε διάφορα γεωυλικά, σε αντίθεση με διάνοιξη με συμβατικά μέσα, όπου σε αυτό το τμήμα θα περιοριζόταν σε πολύ μικρούς ρυθμούς προχώρησης
4. με χρήση κατάλληλου TBM κλειστού τύπου και με σωστή λειτουργία του, μπορεί να επιτευχθεί μείωση των καθιζήσεων λόγω της διάνοιξης αλλά και λόγω της δυνατότητας διατήρησης της στάθμης Υ.Ο.
5. μικρότερο κόστος διάνοιξης και υποστήριξης ανά μέτρο μήκους

Όρια εφαρμογής μηχανών TBM βάσει κοινομετρίας των γεωυλικών



Όρια εφαρμογής μηχανών TBM βάσει κοινομετρίας και διαπερατότητας των γεωλικών

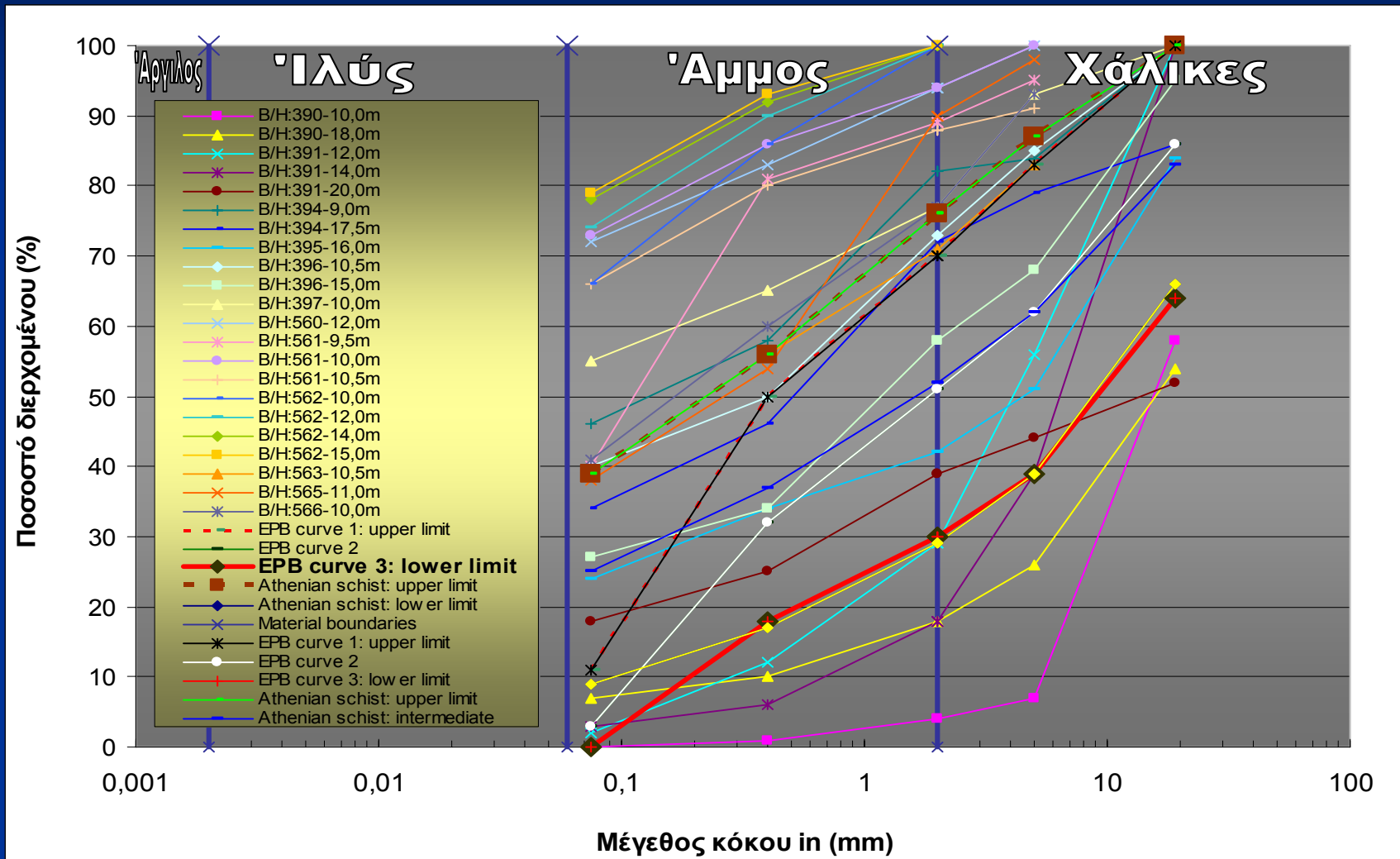


Κριτήρια για την επιλογή μεθόδου

	Αντοχή εδάφους		Απαιτήσεις μεθόδου διάνοιξης			ΕΔΑΦΟΣ			
	Μονοαξον αντοχή (MPa)	Αστράγγιστη διατμητική αντοχή c_u (kPa)	Υποστήριξη μετώπου	Ασπίδα	Επένδυση	Ασυνέχειες RQD	Ασυνέχειες	Μέγεθος κόκκου	
	250					100-90	> 2μ		
	250 – 100				Πίσω απο TBM	90-75	2 – 0,6μ		
ΠΕΤΡΩΜΑ	100 - 50				Πίσω απο TBM	75-50	0,6 – 0,2μ		
	50 – 25		Πιθανά μηχανική		Στο TBM	50-25	0,2–0,06μ		
	25 – 5		Μηχανική		Κάτω απο την ασπίδα	< 25	< 0,06μ		
	5 – 1		Μηχανική, πιθανά EPB		Κάτω απο την ασπίδα	< 25	< 0,06		
ΕΔΑΦΟΣ	< 1	> 30	Μηχανική, πιθανά EPB		Κάτω απο την ασπίδα	< 25	< 0,06		
		30 – 10	Μηχανική ή EPB		Κάτω απο την ασπίδα			>30 %	
		10 – 5	EPB ή Slurry		Κάτω απο την ασπίδα			>20 %	>60%
		5 – 1	EPB ή Slurry		Κάτω απο την ασπίδα			>10 &	>30%
		0	EPB ή Slurry		Κάτω απο την ασπίδα			<10 %	<20%

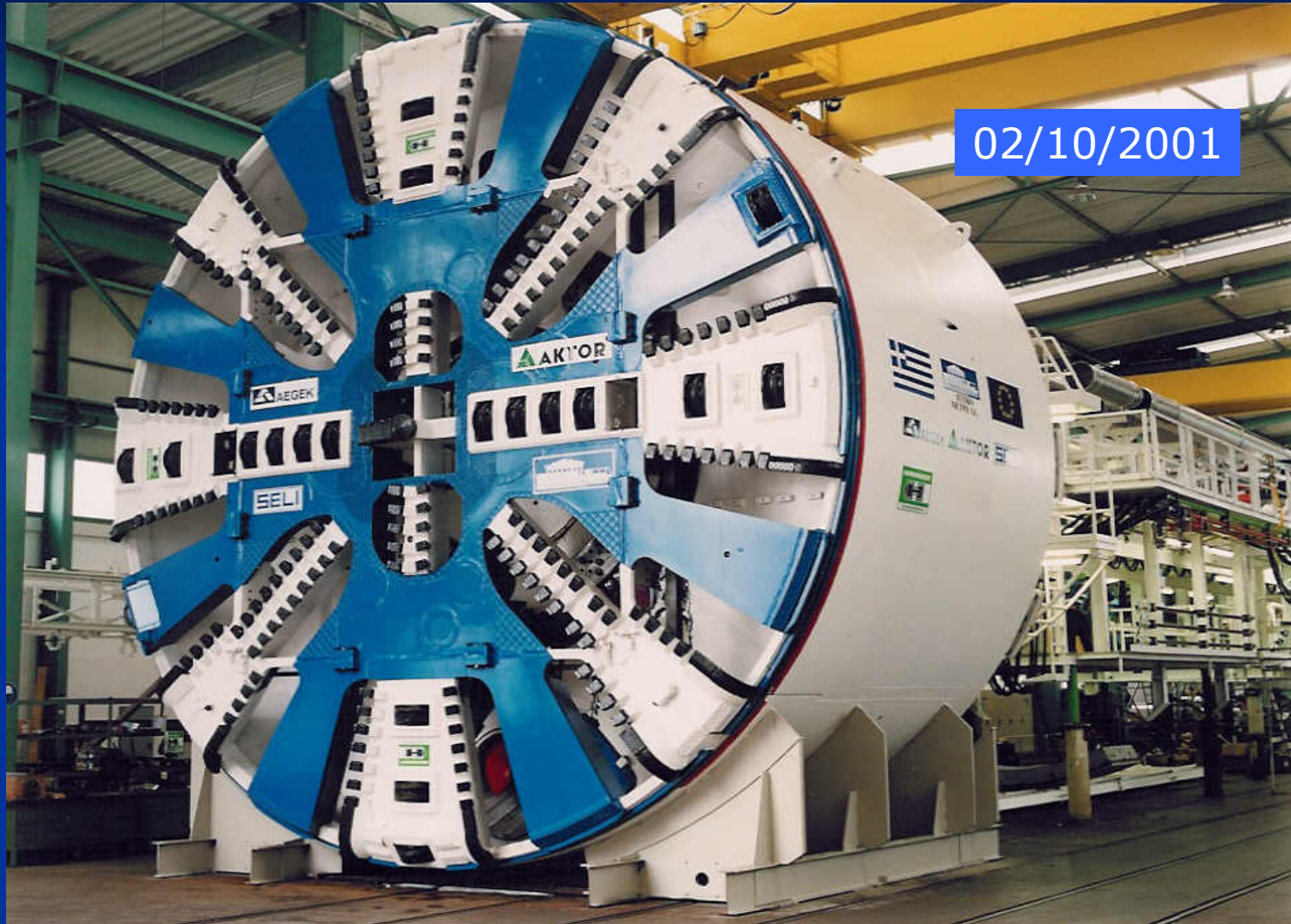
Κοικομετρική διαβάθμιση βάσει των αρχικών γεωτρήσεων

(Από την Χ.Θ. 13+350 έως την Χ.Θ. 16+250, εντός και επάνω από την κλειδα της σήραγγας)



3. Μηχάνημα ολομέτωπης διάνοιξης με ασπίδα εξισορρόπησης πίεσης του εδάφους (EPB)

Μηχάνημα ΕΡΒ Επέκταση Εθνική Άμυνα – Δ. Πλακεντίας



ΗΜΕΡΙΔΑ ΕΕΣΥΕ - 01/02/2007

Βασικά χαρακτηριστικά του EPB (1/2)

Η μηχανή EPB που χρησιμοποιήθηκε στην επέκταση αυτή σχεδιάσθηκε και κατασκευάσθηκε στη Γερμανία.

- Μέγιστη πίεση εκσκαφής: 3,0bar
- Εξ. διάμετρος ασπίδας: 9,440mm
- Ολικό μήκος EPB: 90m
- Μέγιστη ταχύτητα διάνοιξης: 60mm/min
- Ολικό μήκος ασπίδας: 9,040mm
- Βάρος ασπίδας: 625 ton
- Βάρος κεφαλής κοπής: 115 ton
- Συνολική εγκατεστημένη ισχύς: 3,580 kW

Βασικά χαρακτηριστικά του ΕΡΒ (2/2)

- Σύστημα περιστροφής: $6 \times 400 = 2,400$ kW
 - Ταχύτητα περιστροφής: 0-3,0rpm
 - Μέγιστη ροπή 20,236kNm
- Κοχλίας απόληψης και μεταφοράς προϊόντων εισκαφής 400 kW
 - Ταχύτητα περιστροφής: 0-22rpm
- Σπαστήρας: 220 kW
- Κοπτικά εργαλεία
 - Δίσκοι κοπής
 - Ξύστρες
- Αριθμός κυλίνδρων: 2x14
- Συνολική δύναμη ώθησης: 70,900kN
- Σύστημα εισπίεσης πρόσμικτων (αφρός, μπετονίτης, νερό)

Μηχάνημα ΕΡΒ



ΗΜΕΡΙΔΑ ΕΕΣΥΕ - 01/02/2007

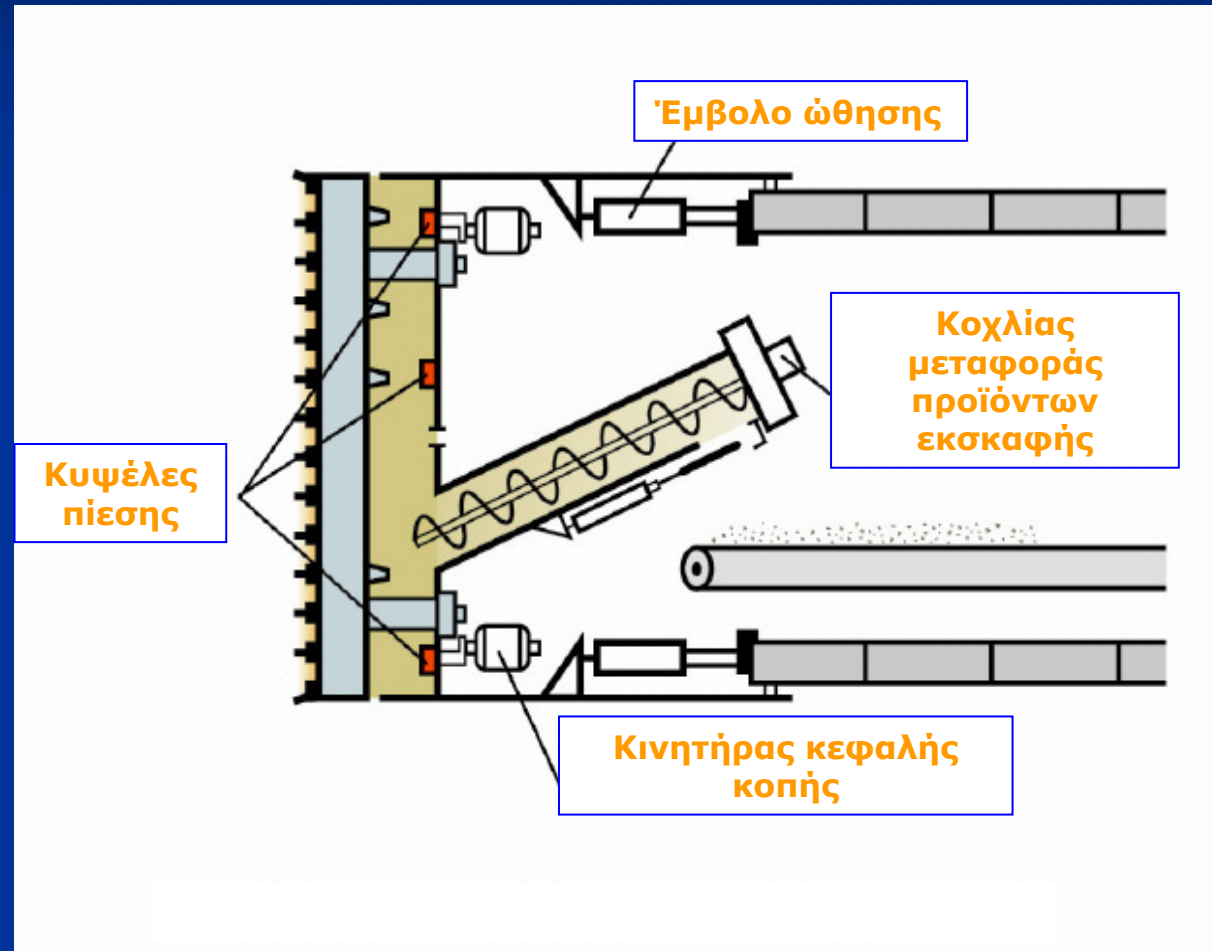
Δοκιμή συστήματος τοποθέτησης προκατασκευασμένων δακτυλίων



02/10/2001

ΗΜΕΡΙΔΑ ΕΕΣΥΕ - 01/02/2007

Τυπική διάταξη συσκευών παρακολούθησης για την πίεση του ΕΡΒ στο μέτωπο της σήραγγας

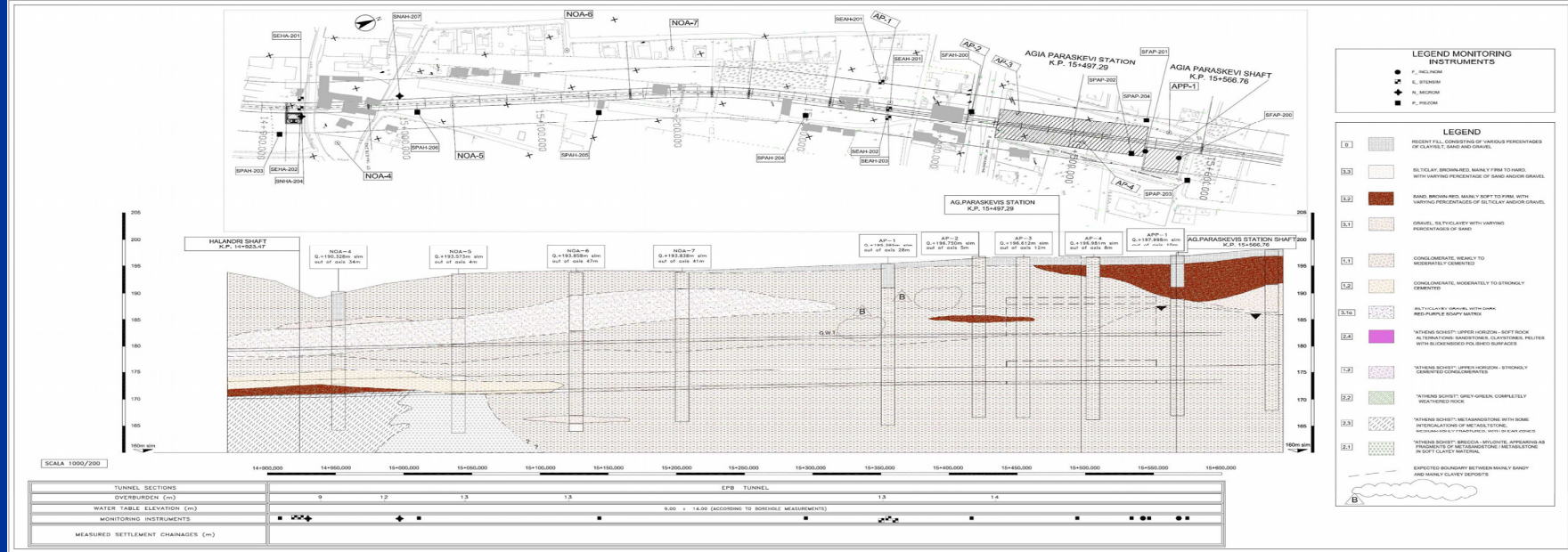
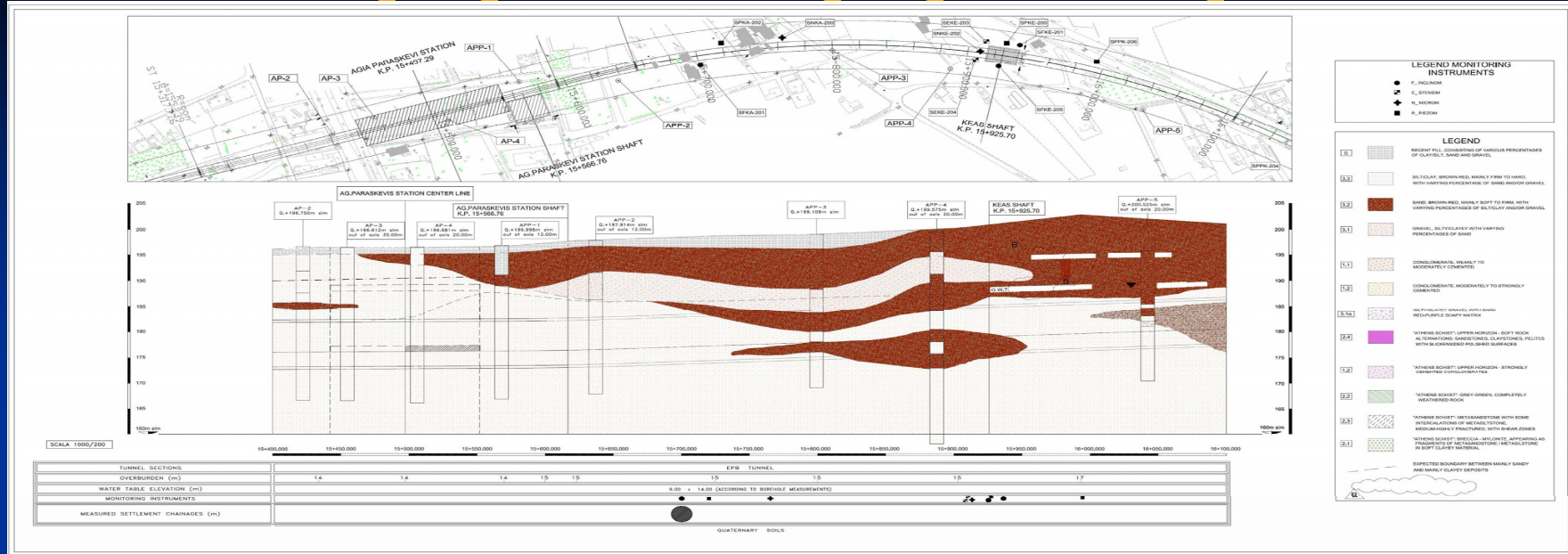


4. Γεωλογικές – Γεωτεχνικές συνθήκες

ΗΜΕΡΙΔΑ ΕΕΣΥΕ - 01/02/2007

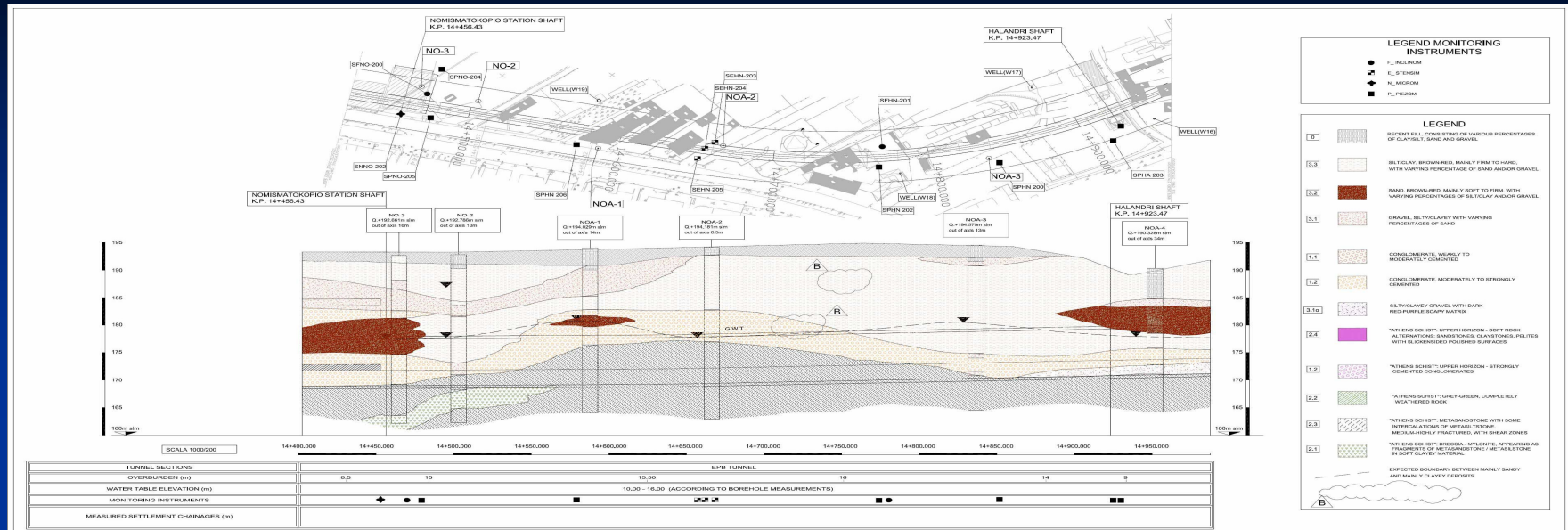


Φρέαο Κέαο – Φρέαο Χαλάνδρι



ΗΜΕΡΙΔΑ ΕΞΕΥΕ - 01/02/2007

Φρέα Χαλάνδρι – Φρέα Φωκίδος

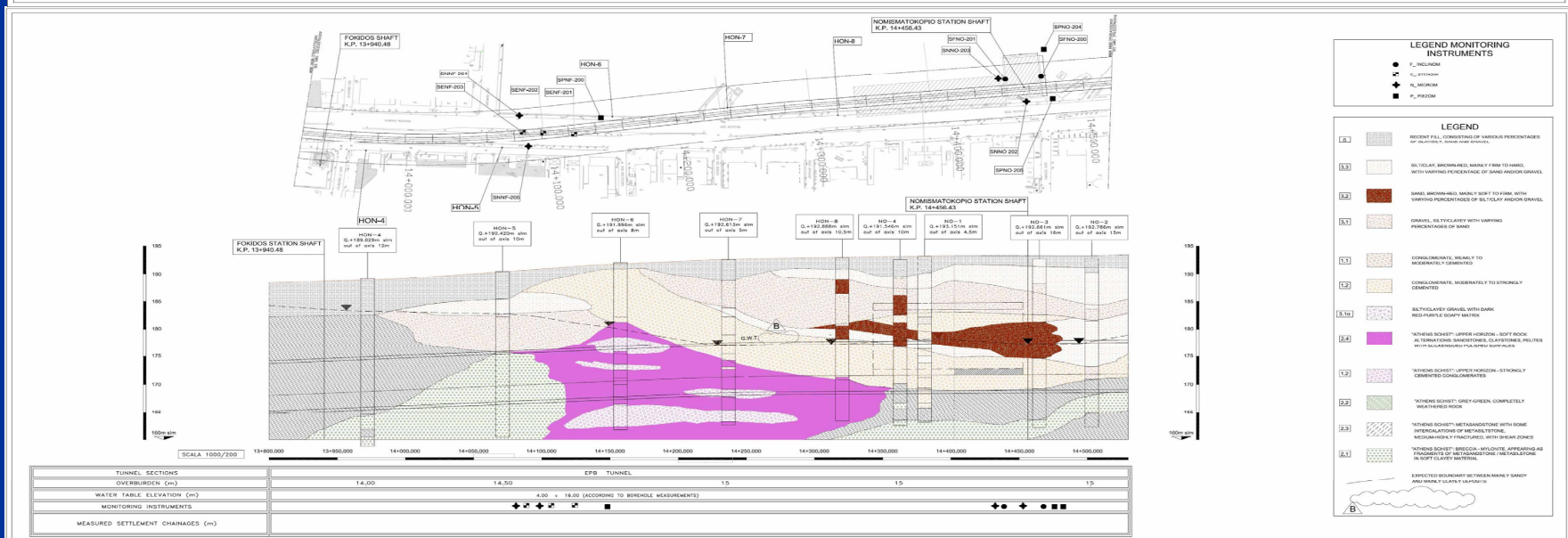


LEGEND MONITORING INSTRUMENTS

- I, INCLINOMETER
- P, PIEZOMETER
- S, SETTLEMENT GAUGE
- M, MICROPIER
- F, FIBER OPTIC

LEGEND

- [Symbol] RECENT FILL, CONSISTING OF VARIOUS PERCENTAGES OF CLAYEIL, SAND AND GRAVEL
- [Symbol] SILTY CLAY, BROWNISH, MAINLY FINE TO MEDIUM, WITH VARYING PERCENTAGE OF SAND AND/OR GRAVEL
- [Symbol] SAND, BROWNISH, MAINLY FINE TO FIRM, WITH VARYING PERCENTAGES OF SILTY CLAY AND/OR GRAVEL
- [Symbol] GRAVEL, SILTY CLAYEIL WITH VARYING PERCENTAGES OF SAND
- [Symbol] CONGLOMERATE, WEAKLY TO MODERATELY CEMENTED
- [Symbol] CONGLOMERATE, MODERATELY TO STRONGLY CEMENTED
- [Symbol] SILTY CLAYEIL GRAVEL WITH DARK RED/BROWN/BLACK MATTY MATRIX
- [Symbol] "ATHENS SCHIST" - UPPER HORIZON - SOFT ROCK, ALTERNATING SANDSTONES, CLAYTONES, PELITES WITH B. CEMENTED POLYGENIC SURFACES
- [Symbol] "ATHENS SCHIST" - UPPER HORIZON - STRONGLY CEMENTED CONGLOMERATES
- [Symbol] "ATHENS SCHIST" - GREY-GREEN, COMPLETELY WEATHERED ROCK
- [Symbol] "ATHENS SCHIST" - METASANDSTONE WITH SOME INTERCALATIONS OF METALTONES, MODERATELY FRACTURED, WITH DEBRIS ZONES
- [Symbol] "ATHENS SCHIST" - METASANDSTONE, WEATHERED AS FRAGMENTS OF METASANDSTONE / METALTONES IN FINE GRAINED MATTING
- [Symbol] EXPECTED BOUNDARY BETWEEN MAINLY SANDY AND MAINLY CLAYEIL DEPOSITS



LEGEND MONITORING INSTRUMENTS

- I, INCLINOMETER
- P, PIEZOMETER
- S, SETTLEMENT GAUGE
- M, MICROPIER
- F, FIBER OPTIC

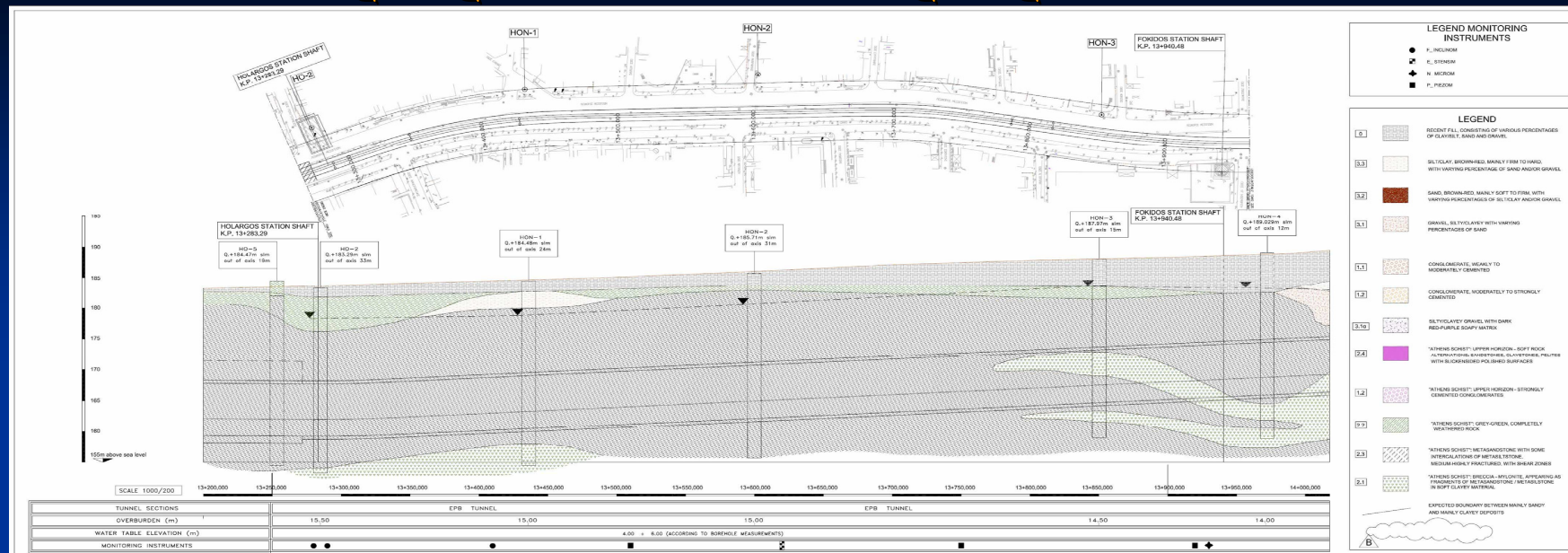
LEGEND

- [Symbol] RECENT FILL, CONSISTING OF VARIOUS PERCENTAGES OF CLAYEIL, SAND AND GRAVEL
- [Symbol] SILTY CLAY, BROWNISH, MAINLY FINE TO MEDIUM, WITH VARYING PERCENTAGE OF SAND AND/OR GRAVEL
- [Symbol] SAND, BROWNISH, MAINLY FINE TO FIRM, WITH VARYING PERCENTAGES OF SILTY CLAY AND/OR GRAVEL
- [Symbol] GRAVEL, SILTY CLAYEIL WITH VARYING PERCENTAGES OF SAND
- [Symbol] CONGLOMERATE, WEAKLY TO MODERATELY CEMENTED
- [Symbol] CONGLOMERATE, MODERATELY TO STRONGLY CEMENTED
- [Symbol] SILTY CLAYEIL GRAVEL WITH DARK RED/BROWN/BLACK MATTY MATRIX
- [Symbol] "ATHENS SCHIST" - UPPER HORIZON - SOFT ROCK, ALTERNATING SANDSTONES, CLAYTONES, PELITES WITH B. CEMENTED POLYGENIC SURFACES
- [Symbol] "ATHENS SCHIST" - UPPER HORIZON - STRONGLY CEMENTED CONGLOMERATES
- [Symbol] "ATHENS SCHIST" - GREY-GREEN, COMPLETELY WEATHERED ROCK
- [Symbol] "ATHENS SCHIST" - METASANDSTONE WITH SOME INTERCALATIONS OF METALTONES, MODERATELY FRACTURED, WITH DEBRIS ZONES
- [Symbol] "ATHENS SCHIST" - METASANDSTONE, WEATHERED AS FRAGMENTS OF METASANDSTONE / METALTONES IN FINE GRAINED MATTING
- [Symbol] EXPECTED BOUNDARY BETWEEN MAINLY SANDY AND MAINLY CLAYEIL DEPOSITS

ΗΜΕΡΙΑ ΔΕΞΕΥΕ - 01/02/2007



Φρέαα Φωκίδος – Φρέαα Εάνθου



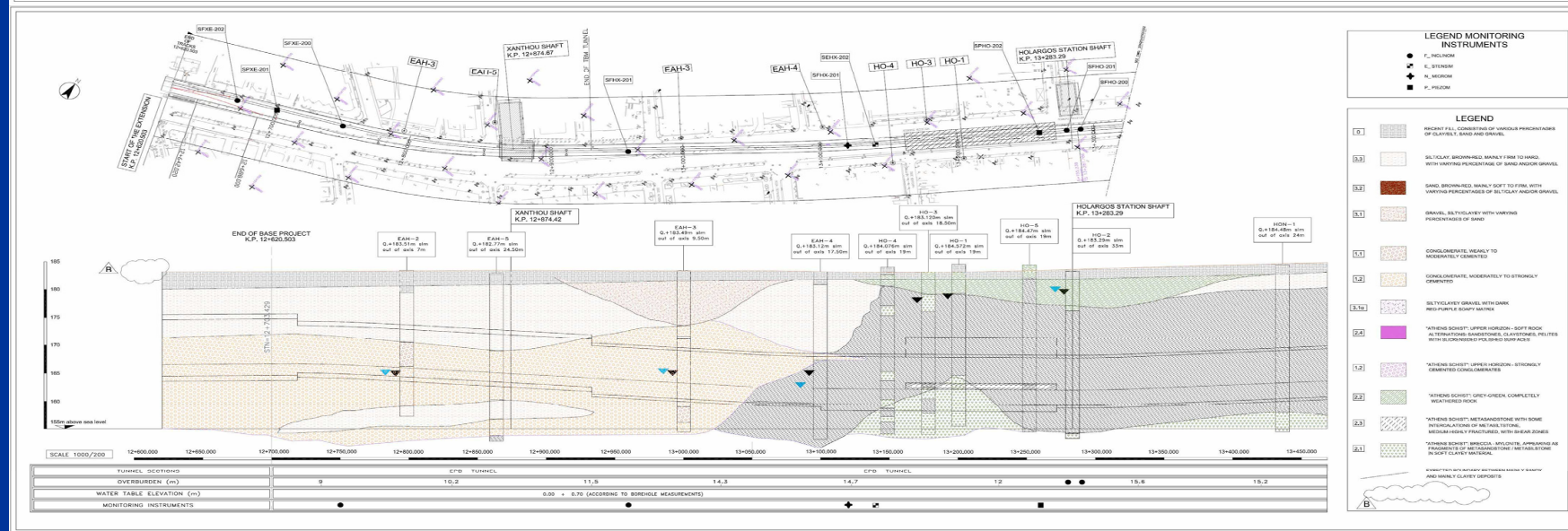
LEGEND MONITORING INSTRUMENTS

- F, INCLINOM
- E, STENSION
- ◆ M, MICROM
- P, PIEZOM

LEGEND

4	RECENT FILL, CONSISTING OF VARIOUS PERCENTAGES OF CLAYEY SAND AND GRAVEL
5,1	SILTCLAY, BROWNISH, MAINLY FIRM TO HARD, WITH VARYING PERCENTAGE OF SAND AND/OR GRAVEL
5,2	SAND, BROWNISH, MAINLY SOFT TO FIRM, WITH VARYING PERCENTAGES OF SILTCLAY AND/OR GRAVEL
5,3	GRAVEL, SILTYCLAY WITH VARYING PERCENTAGES OF SAND
1,1	CONCREGATE, WEAKLY TO MODERATELY CEMENTED
1,2	CONCREGATE, MODERATELY TO STRONGLY CEMENTED
3,10	SILTYCLAYEY GRAVEL WITH DARK RED/PURPLE SOFTY MATRIX
2,4	"ATHENS SOFT" UPPER HORIZON - SOFT ROCK AS TRYPHON GRANITE, OLIVINE PHYLITES WITH SLIGHTNESS OF FOLIOLED SURFACES
1,3	"ATHENS SOFT" UPPER HORIZON - STRONGLY CEMENTED CONGREGATES
0,7	"ATHENS SOFT" GREY-GREEN, COMPLETELY WEATHERED ROCK
2,3	"ATHENS SOFT" METASANDSTONE WITH SOME INTERCALATIONS OF METALS (SILTING, MODERATELY FRACTURED, WITH SHEAR ZONES)
2,1	"ATHENS SOFT" BRECCIA - XPOLYTITE, APPEARING AS FRACTURED METASANDSTONE METASILTSTONE IN SOFT CLAYEY MATERIAL

EXPECTED BOUNDARY BETWEEN MAINLY SANDY AND MAINLY CLAYEY DEPOSITS



LEGEND MONITORING INSTRUMENTS

- F, INCLINOM
- E, STENSION
- ◆ M, MICROM
- P, PIEZOM

LEGEND

4	RECENT FILL, CONSISTING OF VARIOUS PERCENTAGES OF CLAYEY SAND AND GRAVEL
5,1	SILTCLAY, BROWNISH, MAINLY FIRM TO HARD, WITH VARYING PERCENTAGE OF SAND AND/OR GRAVEL
5,2	SAND, BROWNISH, MAINLY SOFT TO FIRM, WITH VARYING PERCENTAGES OF SILTCLAY AND/OR GRAVEL
5,3	GRAVEL, SILTYCLAY WITH VARYING PERCENTAGES OF SAND
1,1	CONCREGATE, WEAKLY TO MODERATELY CEMENTED
1,2	CONCREGATE, MODERATELY TO STRONGLY CEMENTED
3,10	SILTYCLAYEY GRAVEL WITH DARK RED/PURPLE SOFTY MATRIX
2,4	"ATHENS SOFT" UPPER HORIZON - SOFT ROCK AS TRYPHON GRANITE, OLIVINE PHYLITES WITH SLIGHTNESS OF FOLIOLED SURFACES
1,3	"ATHENS SOFT" UPPER HORIZON - STRONGLY CEMENTED CONGREGATES
0,7	"ATHENS SOFT" GREY-GREEN, COMPLETELY WEATHERED ROCK
2,3	"ATHENS SOFT" METASANDSTONE WITH SOME INTERCALATIONS OF METALS (SILTING, MODERATELY FRACTURED, WITH SHEAR ZONES)
2,1	"ATHENS SOFT" BRECCIA - XPOLYTITE, APPEARING AS FRACTURED METASANDSTONE METASILTSTONE IN SOFT CLAYEY MATERIAL

EXPECTED BOUNDARY BETWEEN MAINLY SANDY AND MAINLY CLAYEY DEPOSITS

ΗΜΕΡΙΑ ΕΞΕΥΕ - 01/02/2007

4. Ημερομηνίες ορόσημα – φωτογραφίες του Έργου

ΗΜΕΡΙΔΑ ΕΕΣΥΕ - 01/02/2007



Ημερομηνίες ορόσημα του Έργου

Νοέμβριος 2001	Άφιξη TBM στο σταθμό Χαλάνδρι
Ιανουάριος 2002	Έναρξη εργασιών διάνοιξης σήραγγας από τον Σταθμό Χαλάνδρι προς τον Σταθμό Εθνική Άμυνα
Απρίλιος 2002	Άφιξη TBM στο Φρέαρ Κέας
Μάιος 2002	Άφιξη TBM στο Φρέαρ Αγ. Παρασκευής
Σεπτέμβριος 2002	Άφιξη TBM στο Φρέαρ Νομισματοκοπείου
Φεβρουάριος 2003	Ολοκλήρωση διάνοιξης σήραγγας TBM από τον Σταθμό Χαλάνδρι μέχρι το Φρέαρ Ξάνθου μήκους 3,5km

Σταθμός Χαλάνδρι – Εργασίες εισιαφής σήραγγας NATM μήκους 15μ για την τοποθέτηση του ΕΡΒ



ΗΜΕΡΙΔΑ ΕΕΣΥΕ - 01/02/2007

Σταθμός Χαλάνδρι – Γενική άποψη του συστήματος υποστήριξης του ΕΡΒ



ΗΜΕΡΙΔΑ ΕΕΣΥΕ - 01/02/2007

Σταθμός Χαλάνδρι – Μεταλλικό πλαίσιο ενκίνησης του ΕΡΒ



ΗΜΕΡΙΔΑ ΕΕΣΥΕ - 01/02/2007

Άφιξη του ΕΡΒ στο Φρέαρ Κέας



ΗΜΕΡΙΔΑ ΕΕΣΥΕ - 01/02/2007

Φρέαρ Κέας – Άποψη της σήραγγας



ΗΜΕΡΙΔΑ ΕΕΣΥΕ - 01/02/2007

Άποψη Σταθμού Χαλάνδρι



ΗΜΕΡΙΔΑ ΕΕΣΥΕ - 01/02/2007

Το μηχάνημα ΕΡΒ στο Φρέαρ Αγ. Παρασκευής



16/07/2002



ΗΜΕΡΙΔΑ ΕΕΣΥΕ - 01/02/2007

Σήραγγα ΤΒΜ στο τμήμα Φρέαρ Κέας – Φρέαρ Αγ. Παρασκευή



16/07/2002

ΗΜΕΡΙΔΑ ΕΕΣΥΕ - 01/02/2007

Εσωτερικό του ΤΒΜ



28/08/2002

ΗΜΕΡΙΔΑ ΕΕΣΥΕ - 01/02/2007

Άποψη του φρέατος Κέας απο την σήραγγα ΤΒΜ



18/09/2002

ΗΜΕΡΙΔΑ ΕΕΣΥΕ - 01/02/2007

Άφιξη του ΕΡΒ στο Φρέαρ Νομισματοκοπείου



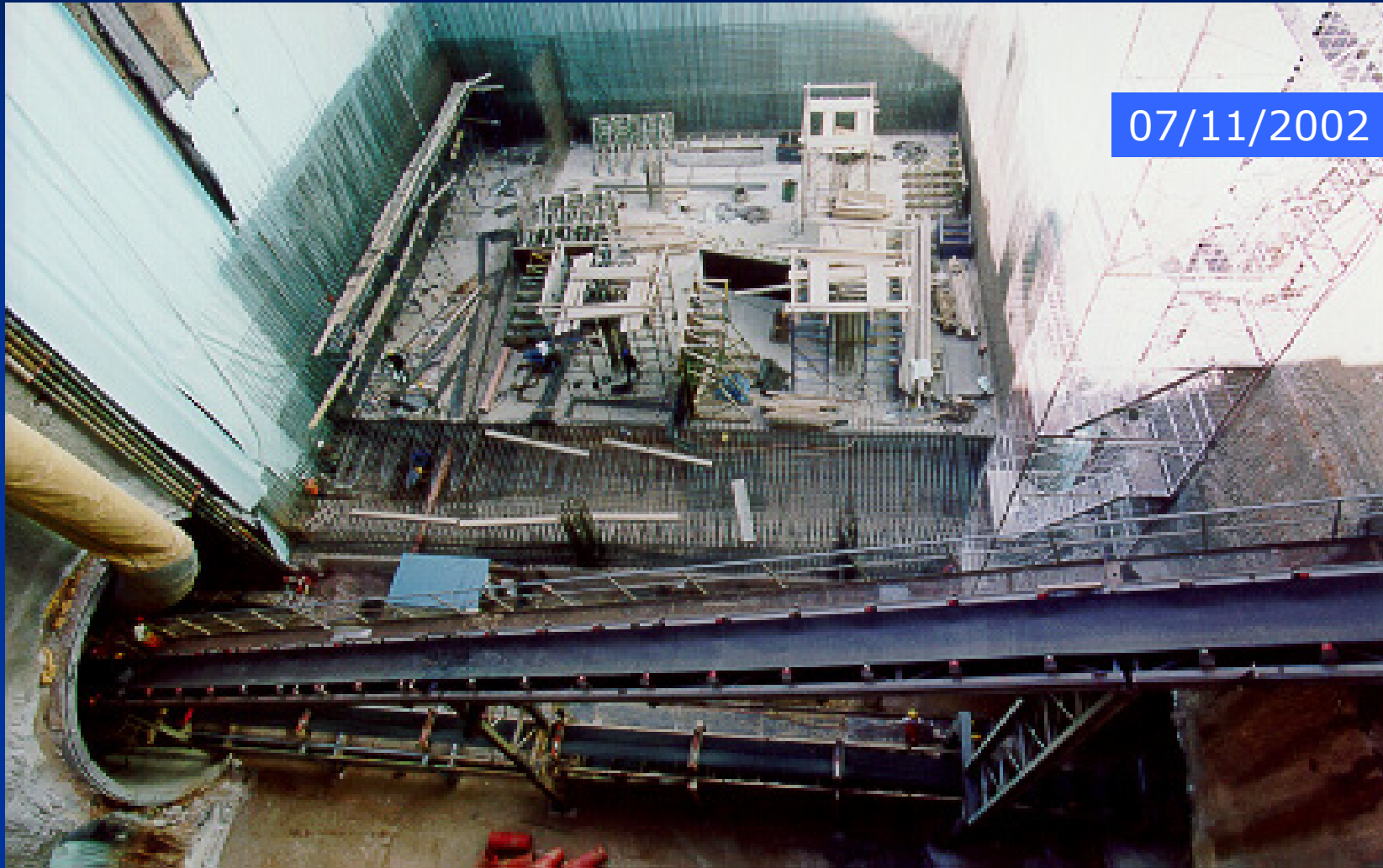
ΗΜΕΡΙΔΑ ΕΕΣΥΕ - 01/02/2007

Σήραγγα ΤΒΜ στο Φρέαρ Νομισματοκοπείο



ΗΜΕΡΙΔΑ ΕΕΣΥΕ - 01/02/2007

Φρέαρ Νομισματοκοπείου



ΗΜΕΡΙΔΑ ΕΕΣΥΕ - 01/02/2007

Σήραγγα ΤΒΜ στο τμήμα Φρέαρ Αγ. Παρασκευής – Φρέαρ Φωκίδος



ΗΜΕΡΙΔΑ ΕΕΣΥΕ - 01/02/2007

Το ΕΡΒ στο υπόγειο άνοιγμα του Σταθμού Χολαργός



28-29/01/2003



01-29-2003

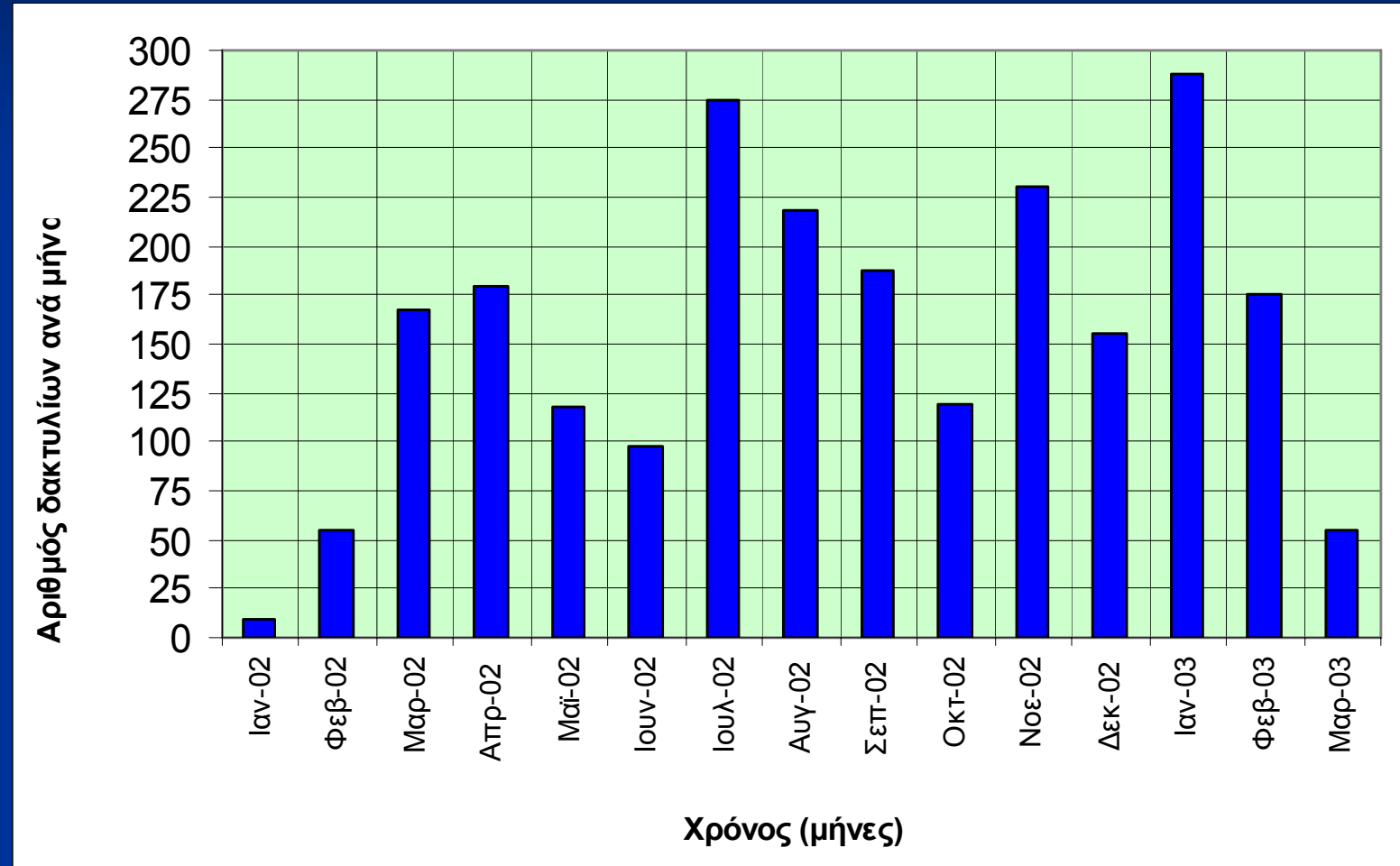


28 1 03

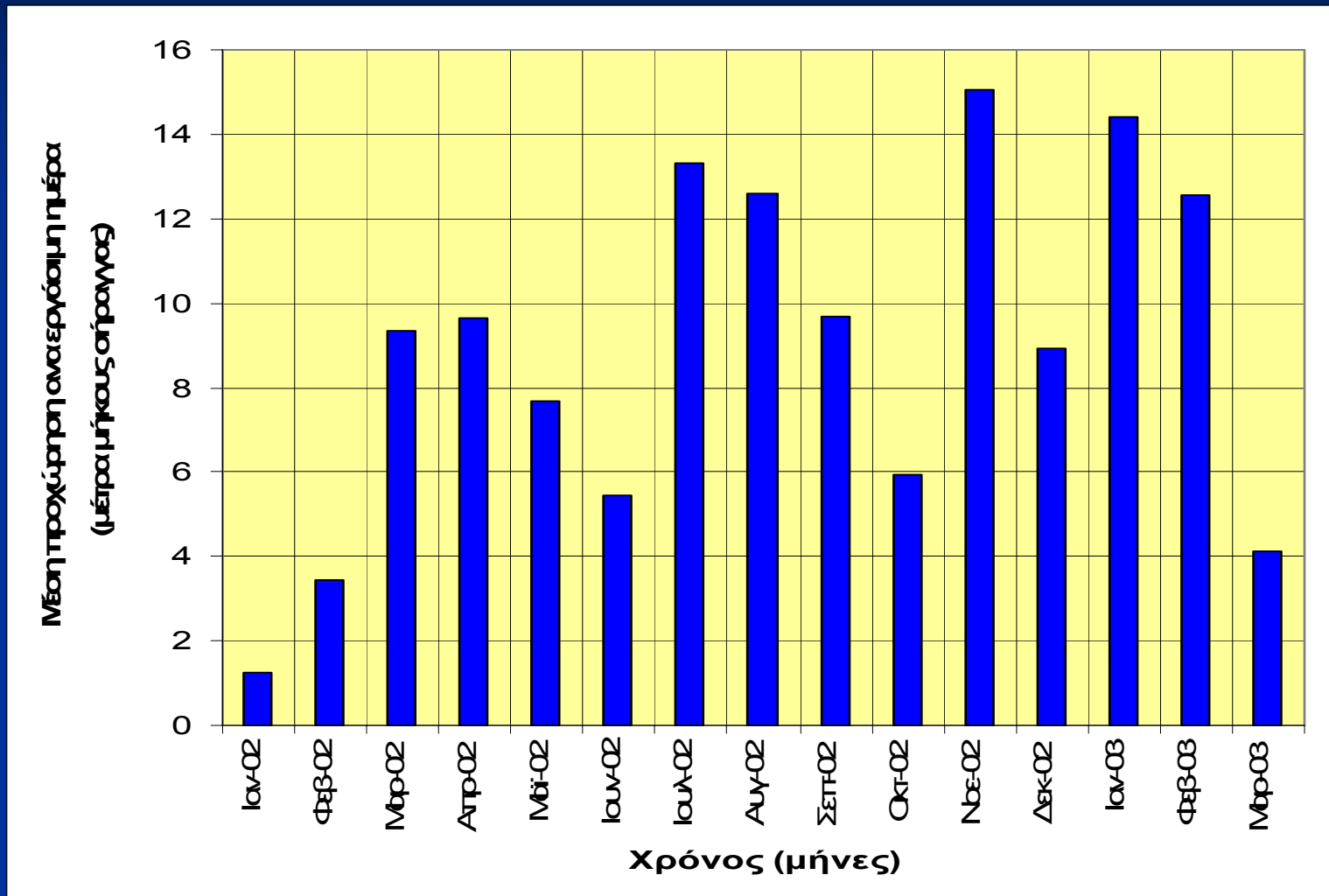
ΗΜΕΡΙΔΑ ΕΕΣΥΕ - 01/02/2007

5. Ορισμένες αναλύσεις αποτελεσμάτων εισπραφής με το ΕΡΒ

Μέση μηνιαία κατανομή πλήθους δακτυλίων του ΕΡΒ



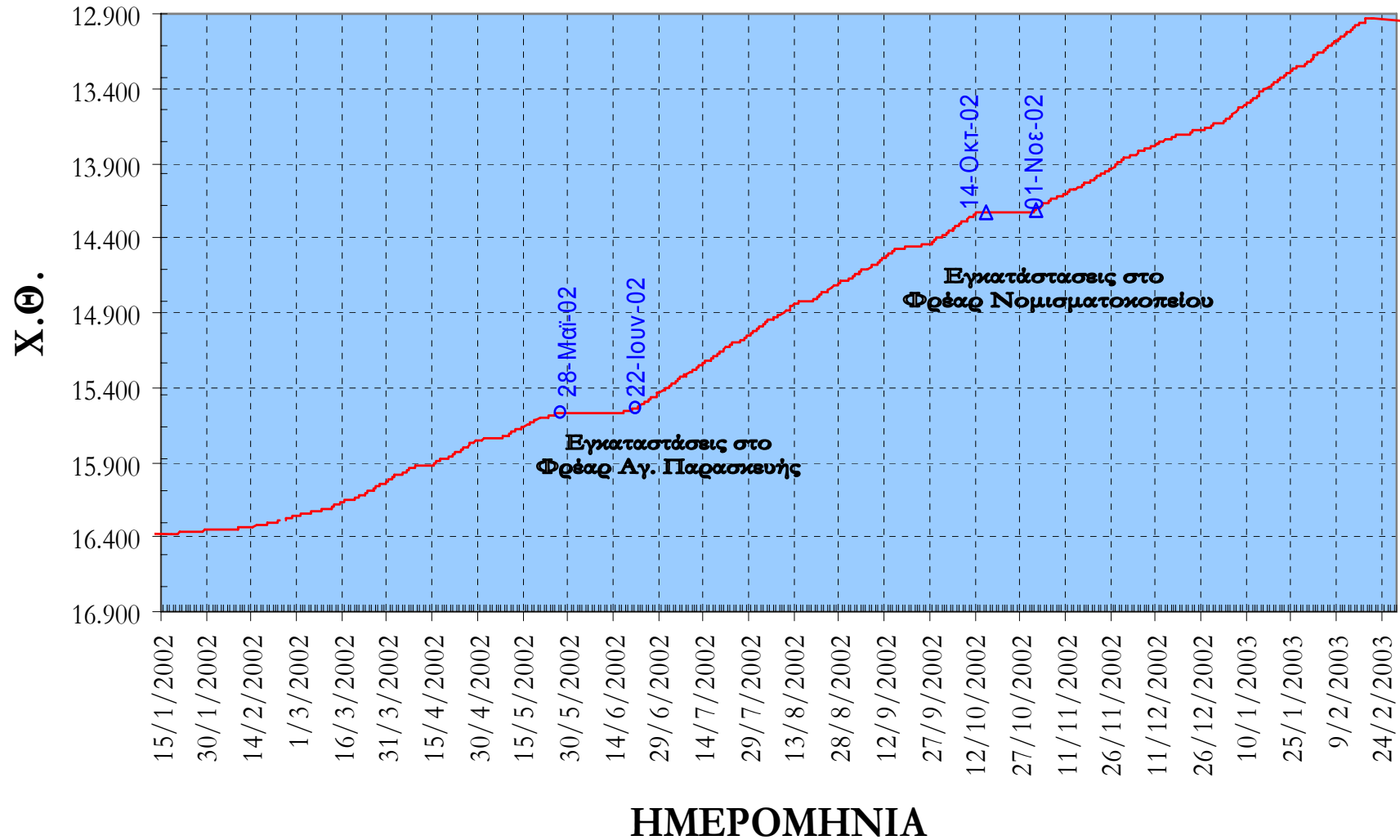
Μέση ημερήσια προχώρηση του ΕΡΒ ανά μήνα



Μέση ημερήσια προχώρηση ανά γεωλογικό σχηματισμό

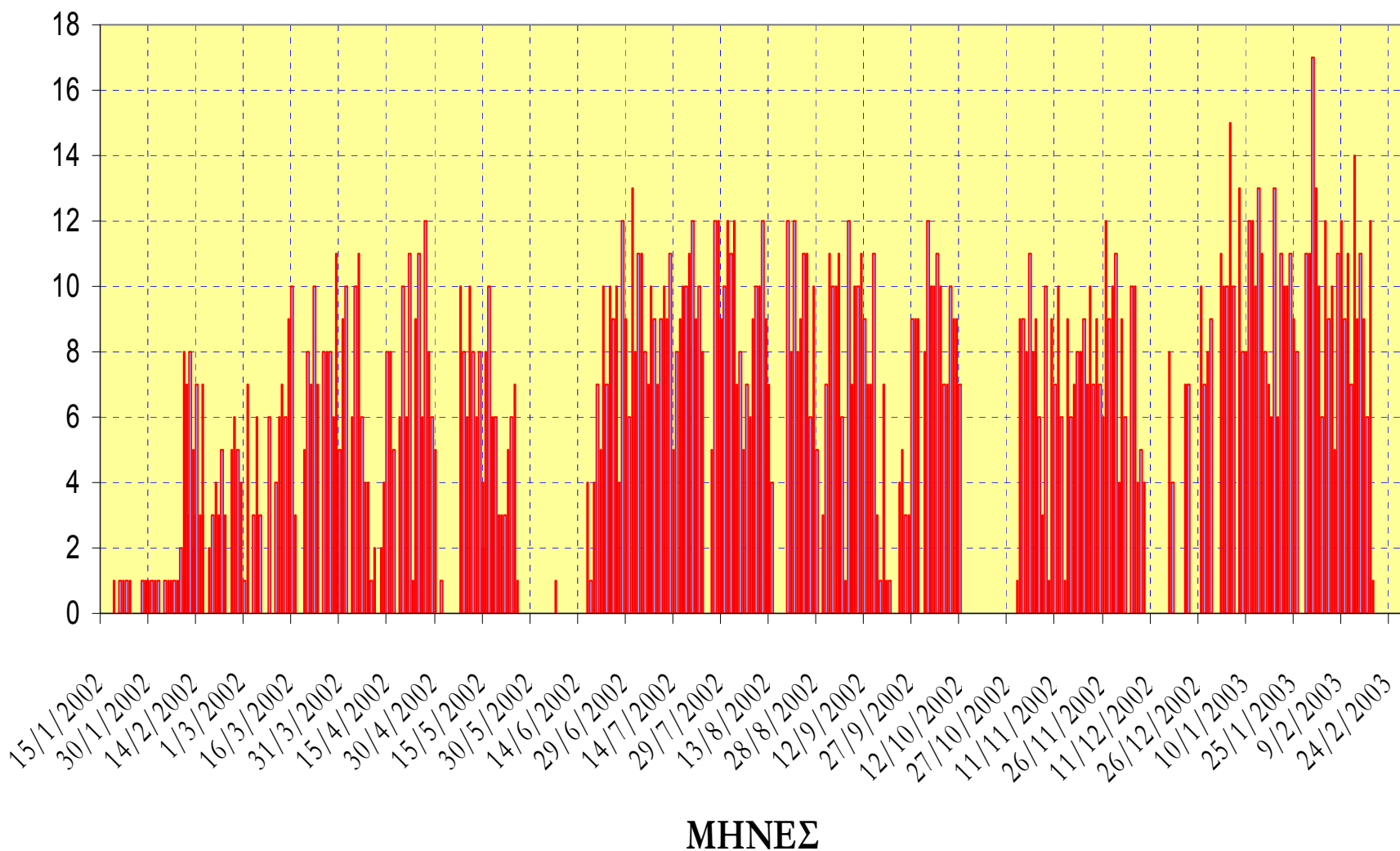
Σχηματισμός	Μήκος (m)	Ταχύτητα εξσκαφής (m/ημερολ. ημέρα)	Παρατηρήσεις
Αθηναϊκός σχιστόλιθος	1480	12,0	Περιλαμβάνει και την διέλευση μέσω της άνω ημιδιατομής του υπογείου ανοίγματος του σταθμού Χολαργός
Τεταρτογενή υλικά	510	8,5	Περιλαμβάνει την περίοδο εκμάθησης και την διέλευση μέσω δύο φρεάτων με εξσκαφή σε ημιδιατομή
Τεταρτογενή υλικά & Αθηναϊκός σχιστόλιθος	1450	10,0	Περιλαμβάνει και την διέλευση μέσω του ορύγματος του σταθμού Νομισματοκοπείο με εξσκαφή σε ημιδιατομή

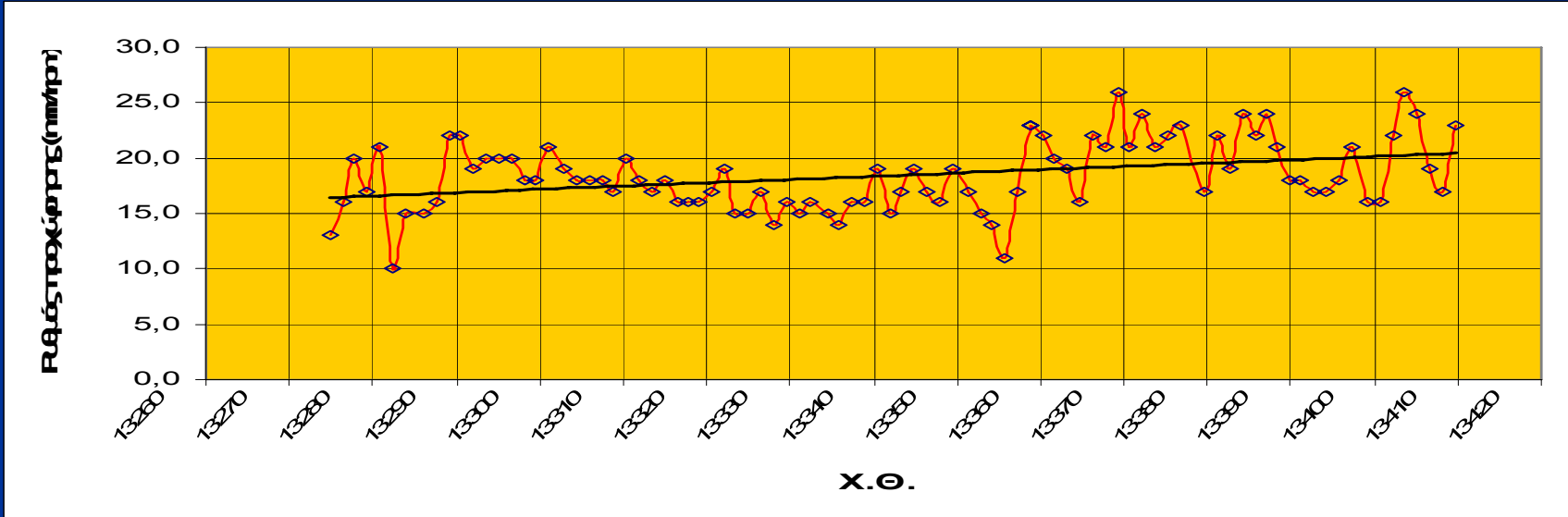
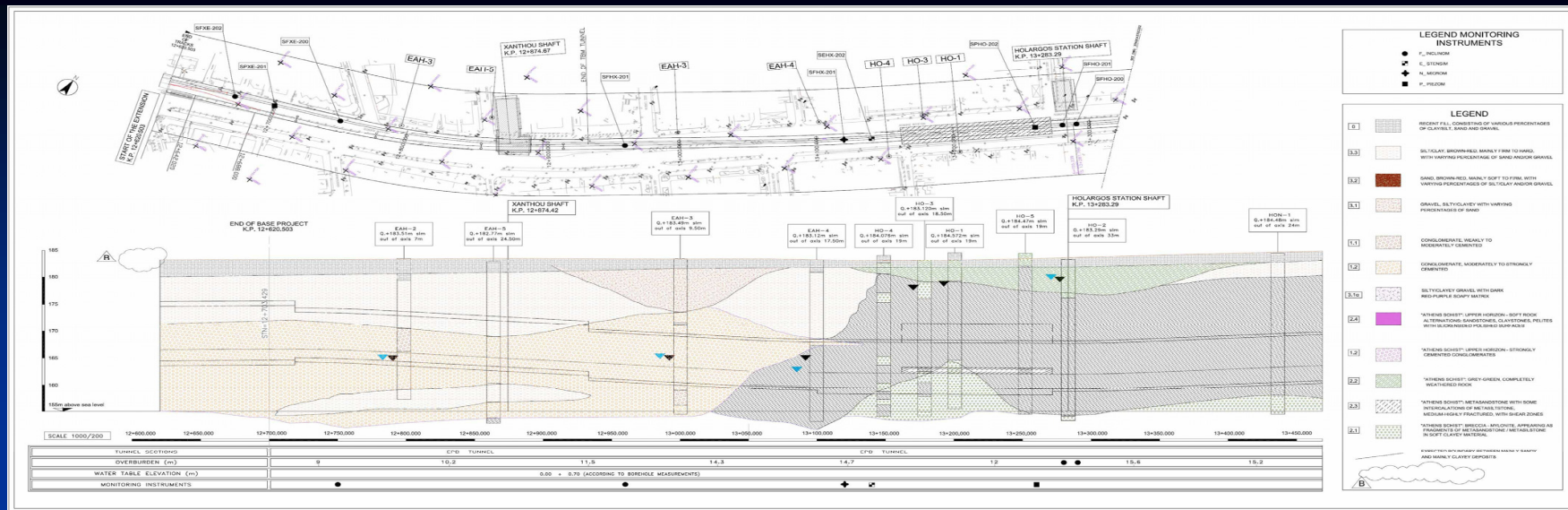
Διάγραμμα προχώρησης του ΕΡΒ



Μεταβολή της ημερήσιας προόδου του ΕΡΒ με το χρόνο

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΑΚΤΥΛΙΩΝ

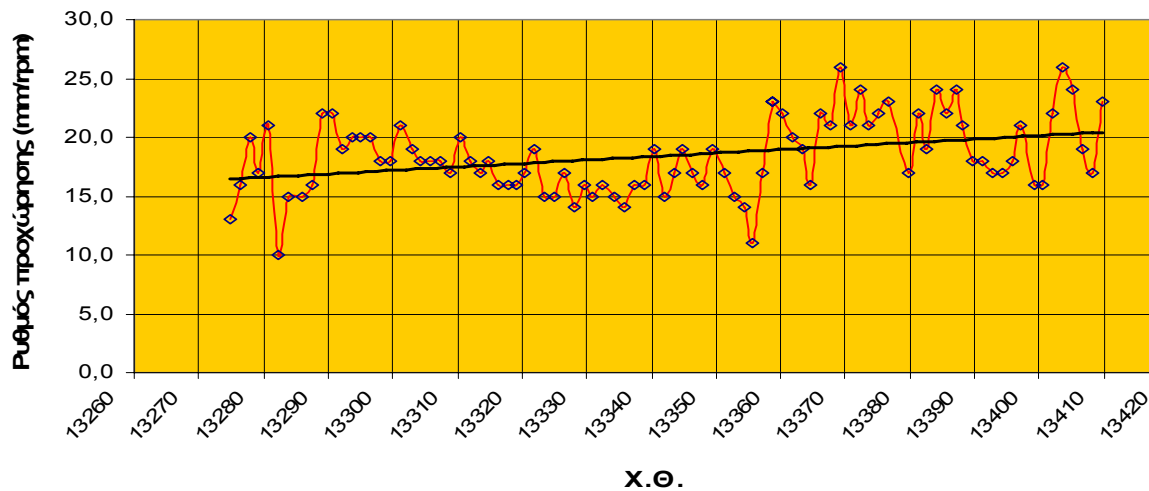
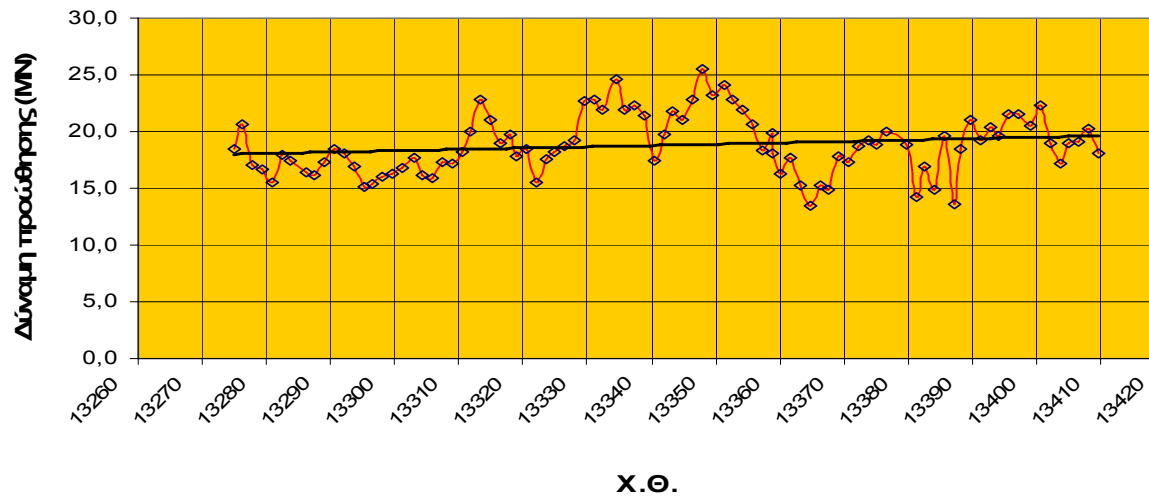




Ανάλυση στοιχείων απο την λειτουργία του EPB στο τμήμα από X.Θ. 13+410 έως X.Θ. 13+270 σε Αθηναϊκό σχιστόλιθο (μεταφαιμίτες μέσης έως υψηλής αποσάθρωσης)

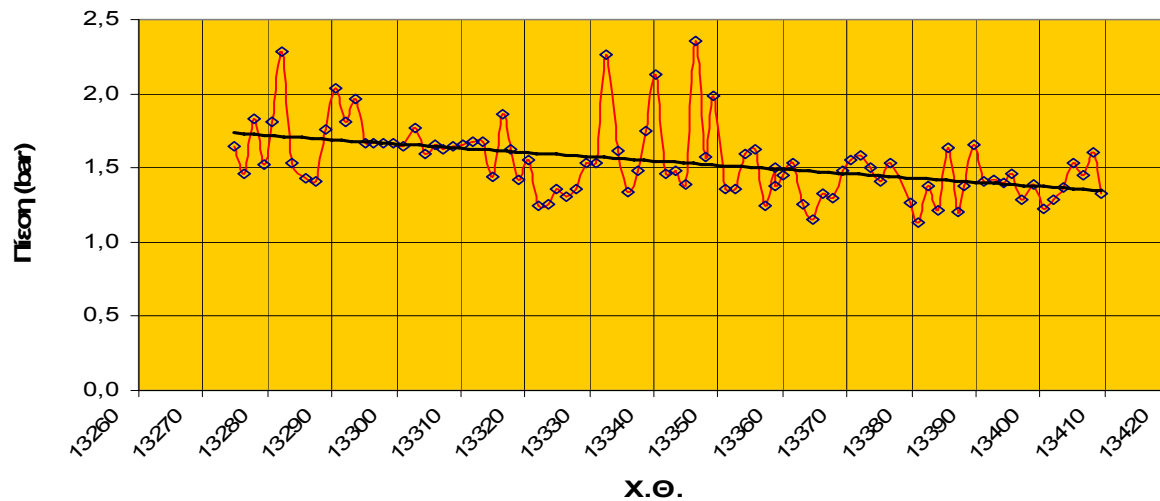
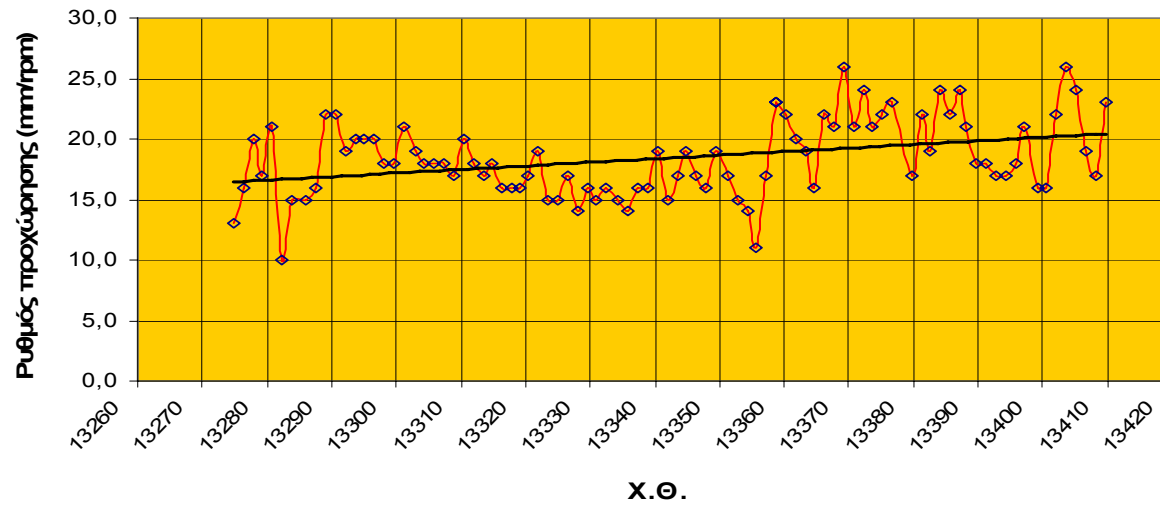
ΗΜΕΡΙΔΑ ΕΕΣΥΕ - 01/02/2007





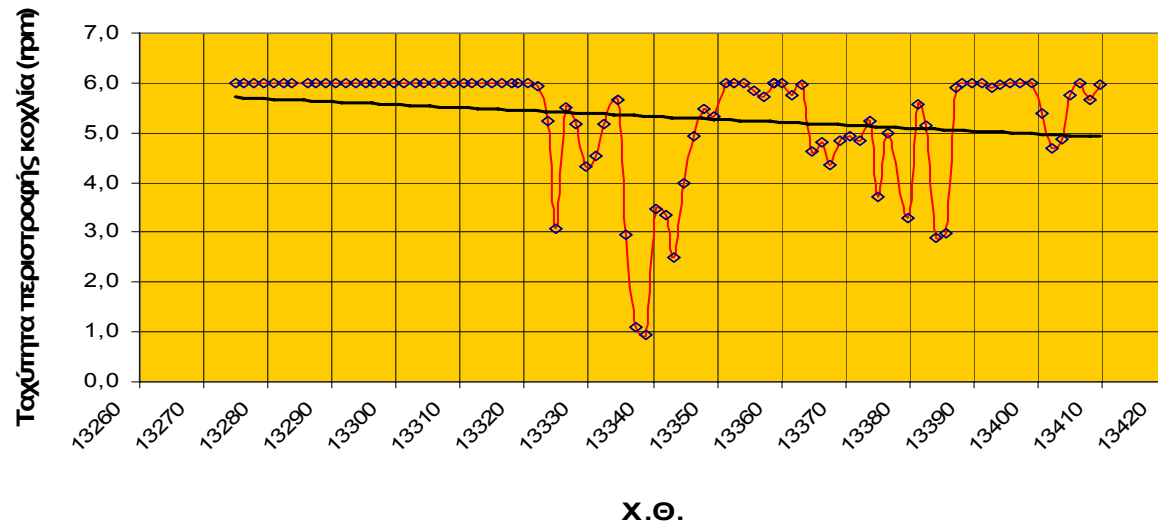
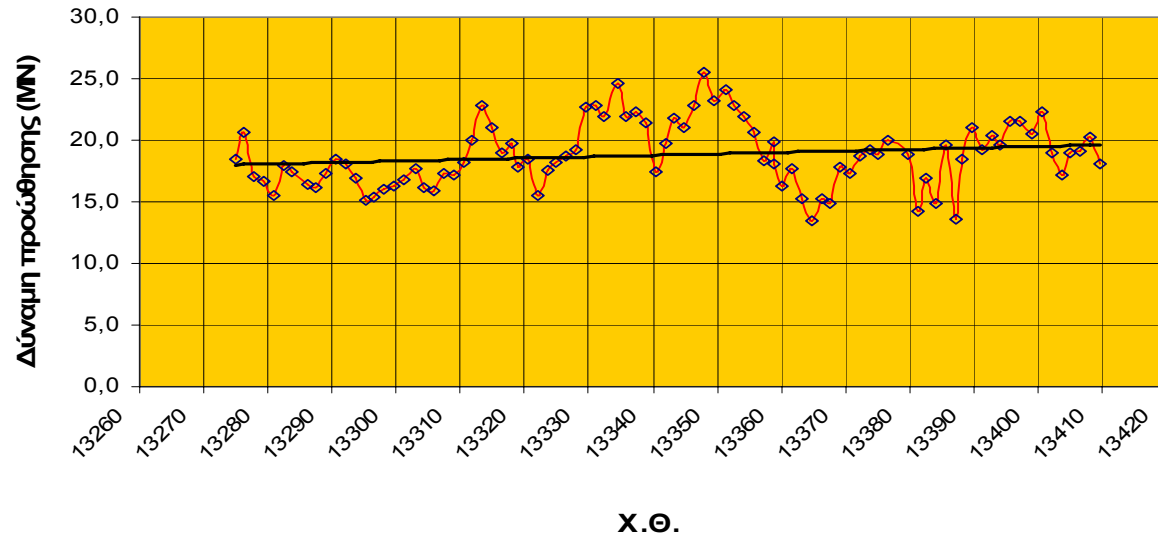
Γεωτεχνικές παράμετροι	Τιμές
γ (kN/m ³)	24
c' (kPa)	80-150
φ' (°)	24
c_u (kPa)	150-300
E (MPa)	800-1200
K (m/s)	$10^{-5} - 10^{-6}$
<i>Bieniawsky classification</i>	III

Ανάλυση στοιχείων απο την λειτουργία του ΕΡΒ στο τμήμα από Χ.Θ. 13+410 έως Χ.Θ. 13+270 σε Αθηναϊκό σχιστόλιθο (μεταφασμίτες μέσης έως υψηλής αποσάθρωσης)

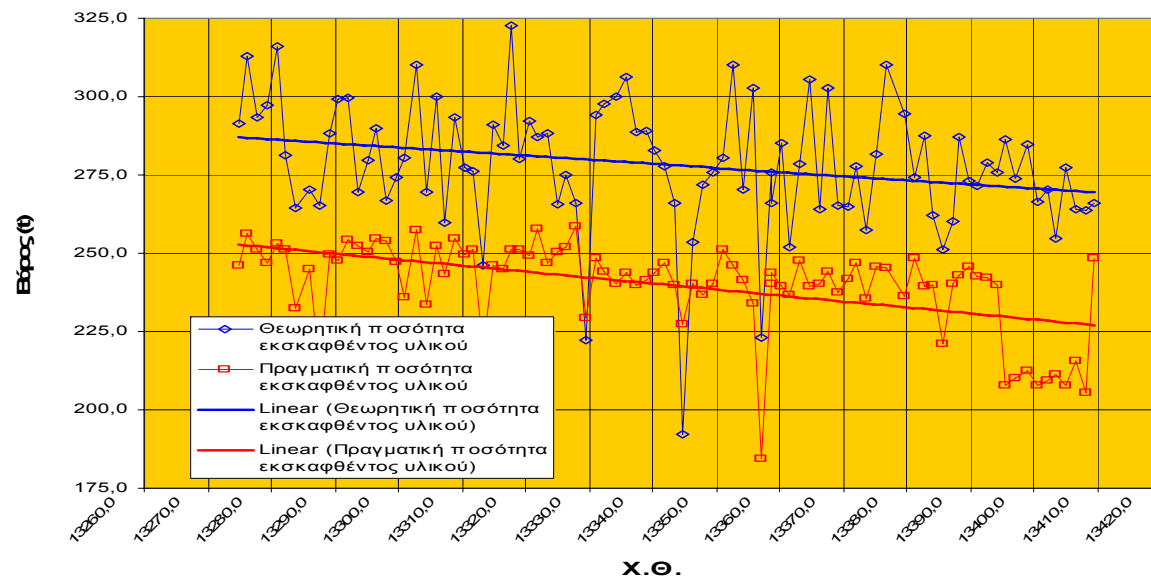
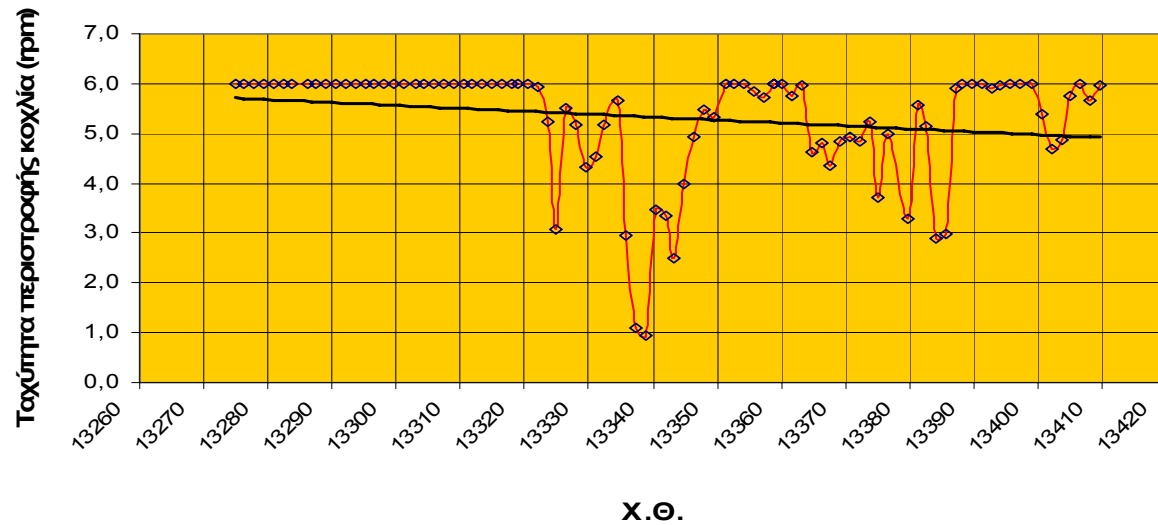


Ανάλυση στοιχείων απο την λειτουργία του ΕΡΒ στο τμήμα από Χ.Θ. 13+410 έως Χ.Θ. 13+270 σε Αθηναϊκό σχιστόλιθο (μεταφαιμίτες μέσης έως υψηλής αποσάθρωσης)

ΗΜΕΡΙΔΑ ΕΕΣΥΕ - 01/02/2007

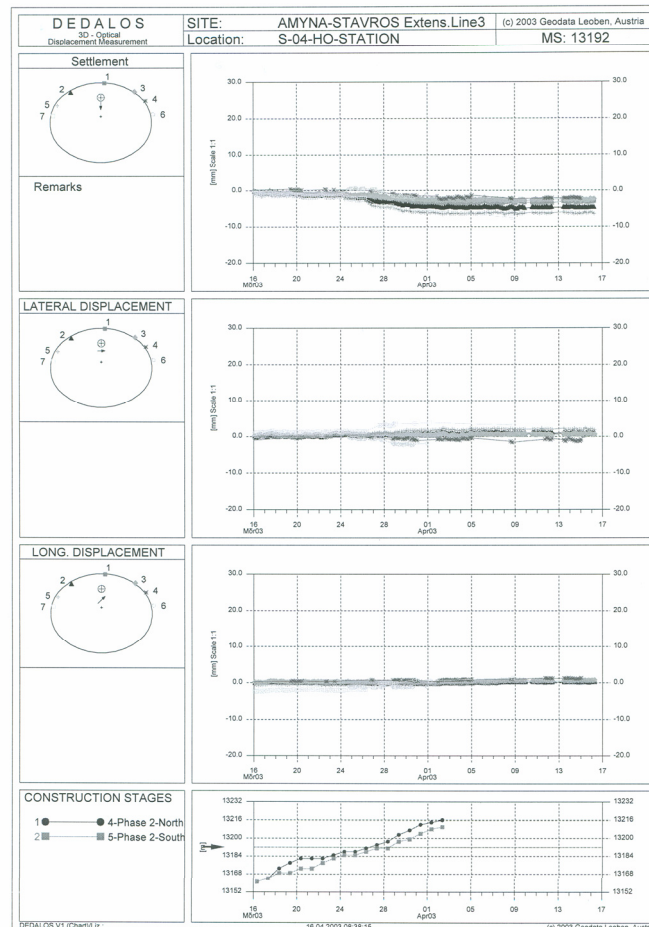


Ανάλυση στοιχείων απο την λειτουργία του ΕΡΒ στο τμήμα από Χ.Θ. 13+410 έως Χ.Θ. 13+270 σε Αθηναϊκό σχιστόλιθο (μεταφασμίτες μέσης έως υψηλής αποσάθρωσης)



Ανάλυση στοιχείων απο την λειτουργία του ΕΡΒ στο τμήμα από Χ.Θ. 13+410 έως Χ.Θ. 13+270 σε Αθηναϊκό σχιστόλιθο (μεταφαιμίτες μέσης έως υψηλής αποσάθρωσης)

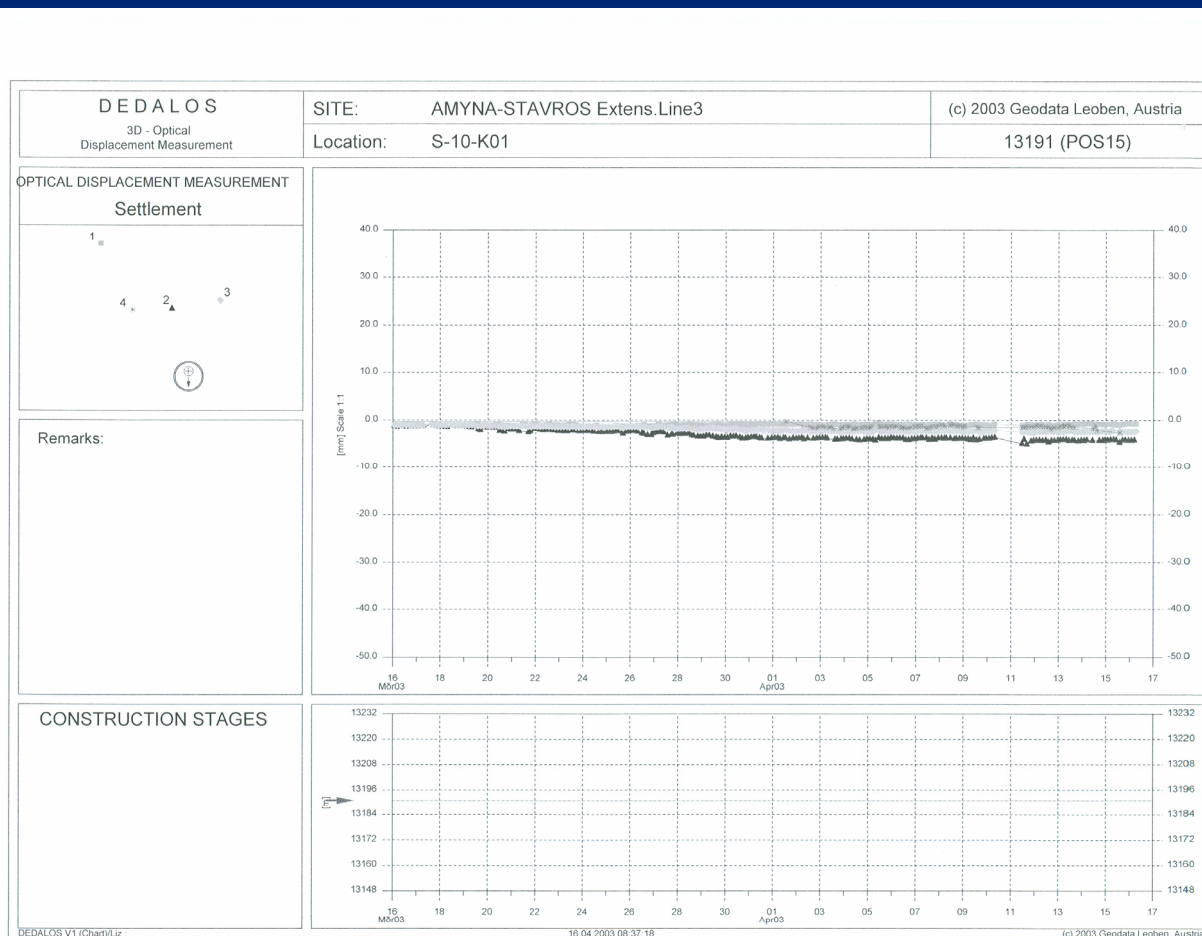
Συγκλίσεις στο υπόγειο άνοιγμα του Σταθμού Χολαργός (3D μετρήσεις οπτικών στόχων με αυτοματοποιημένο σύστημα)



ΗΜΕΡΙΔΑ ΕΞΣΥΕ - 01/02/2007

Επιφανειακές καθιζήσεις πάνω από το υπόγειο άνοιγμα του Σταθμού Χολαργός

(3D μετρήσεις οπτικών στόχων με αυτοματοποιημένο σύστημα μετρήσεις)



ΗΜΕΡΙΔΑ ΕΕΣΥΕ - 01/02/2007

6. Θέματα σχεδιασμού

ΗΜΕΡΙΔΑ ΕΕΣΥΕ - 01/02/2007



Στάδια υπολογισμού σήραγγων ΤΒΜ

■ Βήμα 1^ο: Καθορισμός γεωμετρικών παραμέτρων

Μηκοτομή, διάμετρος εκσκαφής, διάμετρος σήραγγας, πάχος επένδυσης, πλάτος δακτυλίου, σύστημα προιατασιευασμένων δακτυλίων, αρμοί

■ Βήμα 2^ο: Καθορισμός γεωτεχνικών δεδομένων

- Διατμητική αντοχή γεωυλικών, μέτρο Ελαστικότητας, συντελεστής ωθήσεων εδάφους

■ Βήμα 3^ο: Επιλογή κρίσιμων διατομών

- Επιρροή πάχους υπερκειμένων, επιφόρτιση, υδροφόρος ορίζοντας, γειτονικές κατασκευές

■ Βήμα 4^ο : Καθορισμός μηχανικών δεδομένων του ΤΒΜ

- Συνολική δύναμη ώθησης, πλήθος δυνάμεων, πλήθος πέδινων, διαστάσεις πέδινων, πίεση ενεμάτωσης, διαθέσιμος χώρος

Στάδια υπολογισμού σηράγγων ΤΒΜ

■ Βήμα 5^ο: Καθορισμός γεωμετρικών παραμέτρων

- Σκυρόδεμα: αντοχή , μέτρο ελαστικότητας
- Οπλισμοί: τύπος, αντοχή, Παρεμβύσματα: τύπος, διαστάσεις, ελαστικότητα

■ Βήμα 6^ο: Φορτία σχεδιασμού

- Ωθήσεις γαιών, υδροστατική πίεση, κατασκευαστικά φορτία

■ Βήμα 7^ο: Προσομοιώματα μελέτης

- Εμπειρικά προσομοιώματα, αναλυτικά προσομοιώματα, αριθμητικά προσομοιώματα

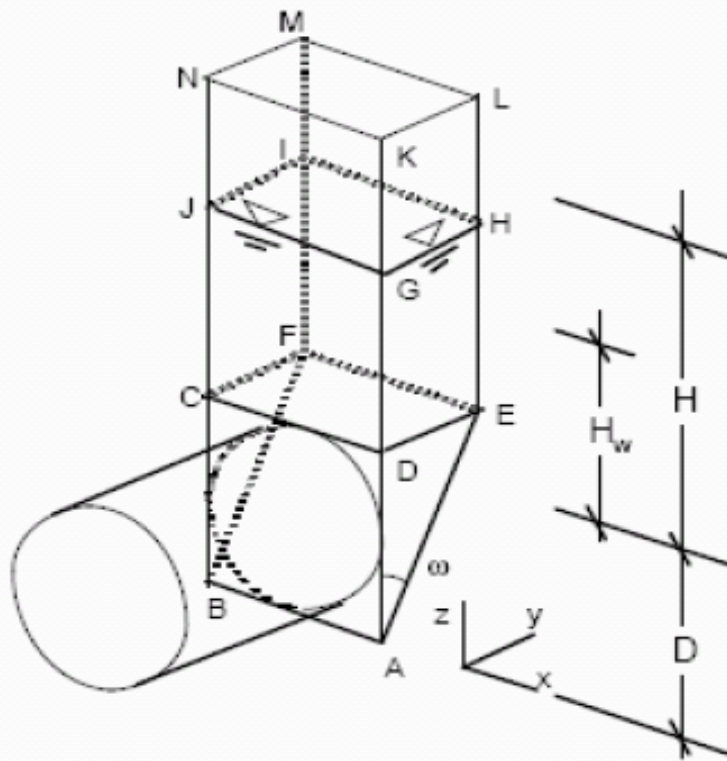
■ Βήμα 8^ο: Αποτελέσματα υπολογισμών

- Απόκριση: Αξονικές δυνάμεις, τέμνουσες, ροπές
- Παραμόρφωση: Οπλισμοί, αρμοί

Γεωτεχνικά δεδομένα για τον υπολογισμό των καθιζήσεων ($\gamma=22-24 \text{ kN/m}^3$, $K_0=0.80$)

Σήραγγα	απο Χ.Θ.	12+900	13+900	15+050	15+750
	έως Χ.Θ	13+900	15+050	15+750	16+370
-	ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	-	-	-	-
Ανώτερη στρώση γεωλικών σε βάθος 12-15μ από την επιφάνεια	Ενεργός συνοχή c' (kPa)	20	20	30	30
	Ενεργός γωνία τριβής φ' (°)	28	28	35	35
	Αστράγγιστη διατμητική αντοχή c_u (kPa)	50	80	75	75
	Μέτρο Ελαστικότητας E (MPa)	120	120	100	50
Κατώτερη στρώση γεωλικών σε βάθος > 15μ	Ενεργός συνοχή c' (kPa)	100	20	35	35
	Ενεργός γωνία τριβής φ' (°)	30	25	25	25
	Αστράγγιστη διατμητική αντοχή c_u (kPa)	300	100	110	90
	Μέτρο Ελαστικότητας E (MPa)	800	100	100	100

Υπολογισμός ενεργού τάσης στήριξης μετώπου



Μηχανισμός ολίσθησης πρίσματος μετώπου κατά Horn (1961)

- $s' = F_0 \gamma' D - F_1 c + F_2 \gamma' \Delta h - F_3 c \Delta h / D$,
(Anagnostou, G. 1996)
- s' : ενεργός τάση στήριξης του μετώπου
- F_0, F_1, F_2, F_3 αδιάστατοι παράμετροι από σχετικά νομογραφήματα
- c : συνοχή,
- φ : γωνία τριβής,
- Δh : η διαφορά πιεζομετρικού ύψους, μεταξύ υδροφόρου ορίζοντα και θαλάμου εισκαφής
- D : διάμετρος εισκαφής,
- H : ύψος υπερκλειμένου,
- γ' : ειδικό βάρος υπό άνωση

Υπολογισμοί απώλειας εδάφους και εκτίμηση μετακινήσεων με αριθμητικές μεθόδους

- Προχωρημένες αριθμητικές μέθοδοι

- πεπερασμένων στοιχείων

- πεπερασμένων διαφορών

(ελαστοπλαστική ανάλυση, συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης, κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb)

- Αναλύσεις για τον υπολογισμό της απώλειας όγκου και την εκτίμηση των μετακινήσεων βάσει του εύρους τιμών τάσεων στήριξης μετώπου.

Υπολογισμός επιφανειακών καθιζήσεων

- Προχωρημένες αριθμητικές μέθοδοι

- πεπερασμένων στοιχείων, πεπερασμένων διαφορών

- Εμπειρικές μέθοδοι εκτίμησης καθιζήσεων

(π.χ. Peck 1969, O' Reilly & New 1982 – Gaussian model), όπου

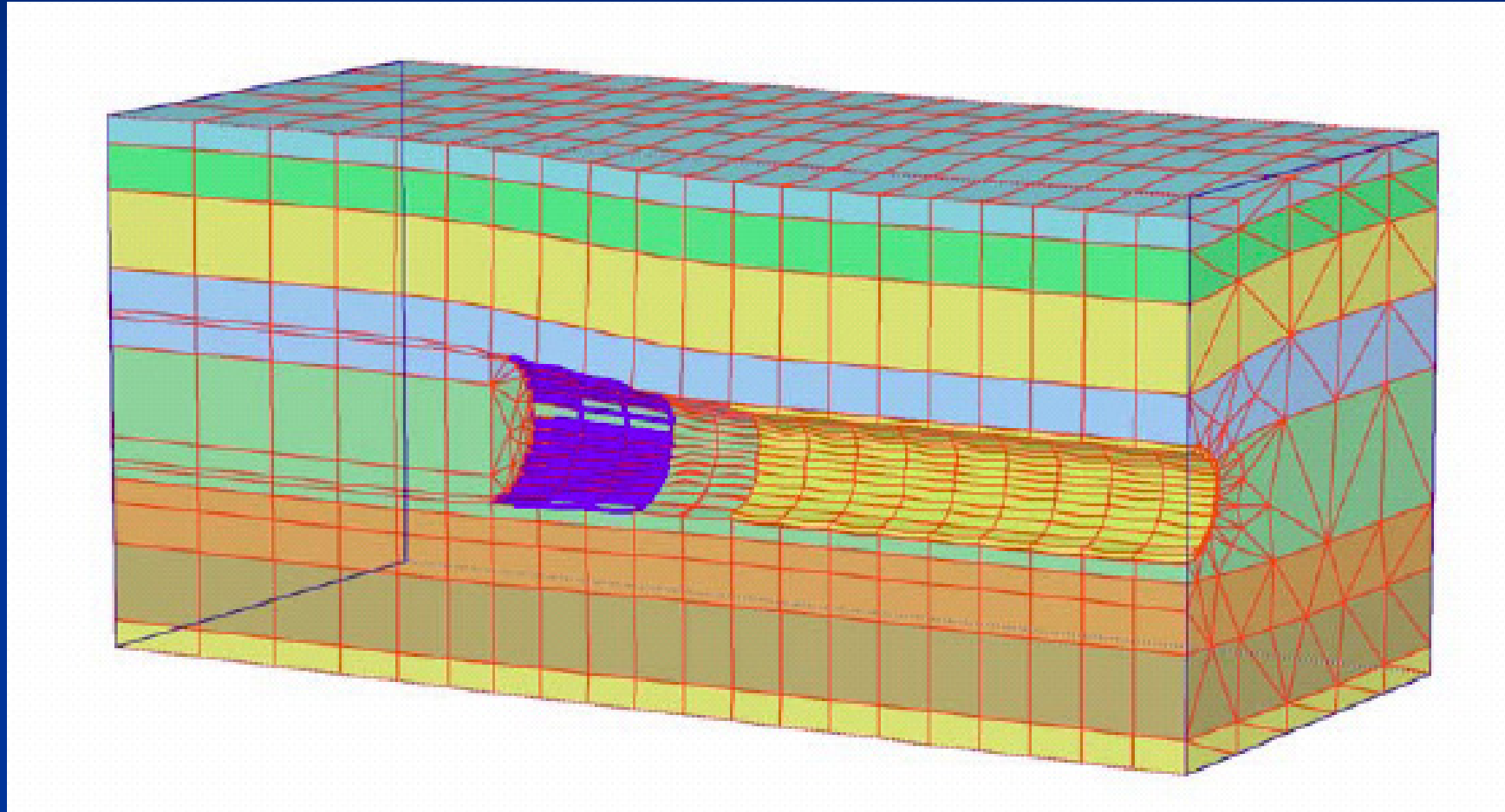
$$S_{(y,z)} = S_{(\max,z)} \exp(-x^2/2i^2), V_s = \sqrt{2\pi} i S_{(\max,z)}, i = Kz, H_{(y,z)} = S_{(y,z)}y/z$$

- $S_{(y,z)}$ & $H_{(y,z)}$: κατακόρυφες και οριζόντιες συνιστώσες των μετακινήσεων

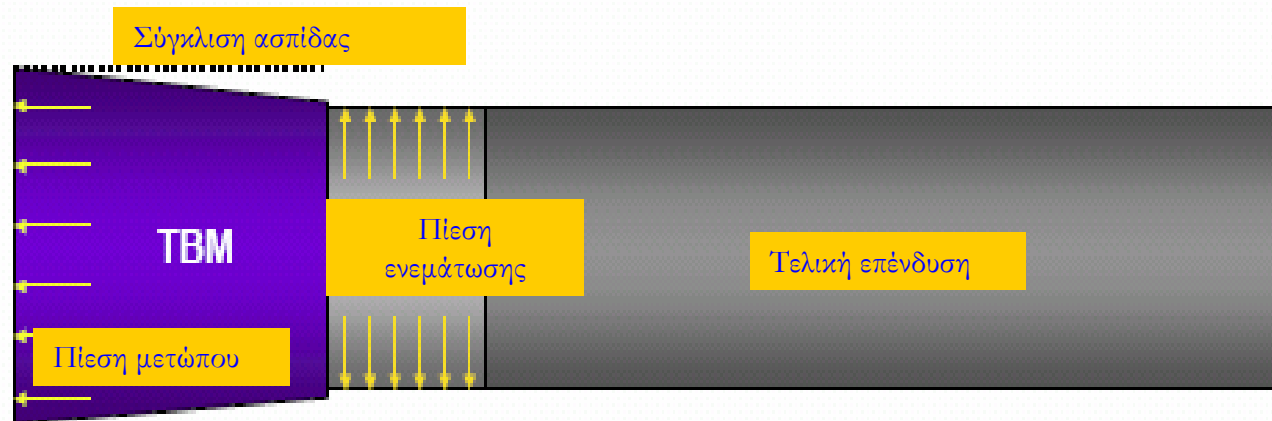
- $S_{(\max,z)}$: μέγιστη επιφανειακή καθίζηση, V_s : όγκος καθιζήσεων

- z : βάθος της σήραγγας, K : σταθερά για το έδαφος

Δυνατότητα τρισδιάστατης προσομοίωσης φάσεων
εκσκαφής και επένδυσης σήραγγας με μηχάνημα ΤΒΜ
με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων



Δυνατότητα προσομοίωσης φάσεων εισκαφής σηράγγων με μηχάνημα TBM



8. Ορισμένα συμπεράσματα - Προοπτιές

ΗΜΕΡΙΔΑ ΕΕΣΥΕ - 01/02/2007



■ Συμπεράσματα

- Η διάνοιξη σηράγγων με EPB σε ευνοϊκά γεωυλικά μπορεί να μειώσει τις καθιζήσεις τόσο στην επιφάνεια του εδάφους όσο και βαθύτερα απο αυτή
- Οι καθιζήσεις μπορούν να ελεγχθούν με το κατάλληλο εύρος πιέσεων στο μέτωπο απο το EPB, που επιτυγχάνεται κυρίως με το βέλτιστο λόγο προχώρησης ως προς την ταχύτητα περιστροφής του κοχλία αποκομιδής
- Οι κατάλληλες τιμές των πιέσεων στο μέτωπο του EPB μπορούν να υπολογισθούν με την χρήση εμπειρικών και αναλυτικών μεθόδων για τα γεωυλικά
- Η ανάλυση, παρουσίαση και συσχέτιση των δεδομένων του EPB με τα αποτελέσματα της γεωμηχανικής παρακολούθησης και την γεωλογική-γεωτεχνική μηκοτομή του έργου, σε κατάλληλα γραφήματα αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο για τον αποτελεσματικό έλεγχο της κατασκευής των σηράγγων

Προοπτικές

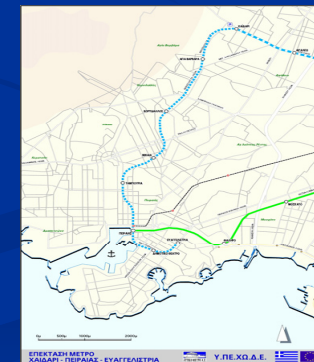
Η μέθοδος ολομέτωπης διάνοιξης με Ασπίδα Εξισορρόπησης Πίεσης του Εδάφους (EPB) θα εφαρμοσθεί:

α) στην υπό εξέλιξη κατασκευή των έργων της Επέκτασης της Γραμμής 2 Τμήμα Αγ. Δημήτριος – Ελληνικό

β) στην υπό εξέλιξη κατασκευή των έργων για το ΜΕΤΡΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ



γ) ενώ στο υπό Δημοπράτηση έργο της Επέκτασης της Γραμμής 3 Τμήμα Χαϊδάρι – Πειραιάς – Ευαγγελίστρια, μαζί με την Μέθοδο διάνοιξης με πολφό (Slurry), αποτελεί μια από τις πιθανές μεθόδους διάνοιξης των σηράγγων



Βιβλιογραφικές αναφορές

- APXEIA ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΑΕ
- Recommendations for selecting and evaluating tunnel boring machines
DAUB Tunnel 5/97
- Geo-Checklist (HERRENKNECHT, 2006)
- Specification and Guidelines for the use of specialist products for
Mechanised Tunnelling (TBM) in Soft Ground and Hard Rock, April
2005, EFNARC
- Selection and Evaluation of Tunnelling Methods for different
Geotechnical conditions, Private Seminar, by Dr.-Ing. E.h. Siegmund
Babendererde, Athens, Greece, 2001
- Wagner, H., Schulter, A. (1996) Tunnel Boring Machines, Trends in
Design & Construction of Mechanised Tunnelling, Balkema
Rotterdam
- Maidl, B., Schmid, L., Ritz, W. and Herrehknecht, M. (2001)
Tunnelbohrmaschinen im Hartgestein, Ernst & Sohn
- Braach, O. (2004) Comparison of Face Pressurized Shield Methods in
Various Soil Conditions, ITA-AITES