



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Μοντελοποίηση διάνοιξης σιράγγων και αναλύσεις ευστάθειας υπό
την επίδραση της στρωματογραφίας με τη χρήση αριθμητικών
μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών**

**ΓΕΡΑΜΑΝΗ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑ
ΠΙΤΣΙΟΥΓΚΑ ΕΙΡΗΝΗ**

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους
των απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού

**ΒΟΛΟΣ
ΙΟΥΛΙΟΣ 2018**

© 2018 Ελευθερία Γεραμάνη, Ειρήνη Πιτσιούγκα

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας ανήκουν αποκλειστικά στους συγγραφείς και δεν εκφράζουν την επίσημη άποψη της Εγνατία Οδός Α.Ε..

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής
(Επιβλέπων)

Δρ. Γεώργιος Εφραιμίδης

Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής

Δρ. Πολυξένη Καλλιόγλου

Λέκτορας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής

Δρ. Αντιγόνη Βράννα

Διδάσκουσα, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τον επιβλέποντα της διπλωματικής μας εργασίας, Επίκουρο Καθηγητή κ. Γεώργιο Εφραιμίδη, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Επιπλέον, οφείλουμε ευχαριστίες στα υπόλοιπα δύο μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής, τη Λέκτορα κα. Πολυξένη Καλλιόγλου και τη Διδάσκουσα Αντιγόνη Βράννα. Ευχαριστούμε ακόμη τη Διδάσκουσα Σπυριδούλα Μπαρέκα για τις χρήσιμες συμβουλές της κάθε φορά που ζητήσαμε τη βοήθειά της σε θέματα που σχετίζονταν με το αντικείμενο της διπλωματικής μας. Επί προσθέτως θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε την εταιρεία Εγνατία Οδός Α.Ε. για την παραχώρηση των δεδομένων που ήταν αναγκαία για την εκπόνηση της εργασίας.

Ακόμη, θα θέλαμε να απευθύνουμε ένα μεγάλο ευχαριστώ στους φίλους και στις οικογένειες μας, για την αμέριστη συμπαράσταση και υποστήριξη τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μας.

Ελευθερία Γεραμάνη – Ειρήνη Πιτσιούγκα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την προσομοίωση διάνοιξης απλής και δίδυμης σήραγγας, των μέτρων προσωρινής υποστήριξης που χρησιμοποιήθηκαν και την επίδραση της στρωματογραφίας με τη χρήση των προγραμμάτων FLAC 7.0 και PHASE² 8.0. Επιπλέον ασχολείται με την παραμετρική ανάλυση της ευστάθειας της κατασκευής μεταβάλλοντας τις μηχανικές ιδιότητες της περιβάλλουσας βραχώμαζας καθώς και την στρωματογραφία της περιοχής.

Ως σήραγγα αναφοράς θεωρείται η σήραγγα της Ιεροπηγής η οποία αποτελεί τμήμα του έργου «Κάθετος άξονας Εγνατίας οδού Σιάτιστα – Κρυσταλλοπηγή: Τμήμα Κορομηλιά-Κρυσταλλοπηγή» που υλοποιήθηκε από την Εγνατία Οδός Α.Ε. Στα πρώτα κεφάλαια παρουσιάζονται γενικά στοιχεία για την σήραγγα και την περιοχή που κατασκευάστηκε. Τα στοιχεία αυτά αφορούν την γεωτεκτονική δομή και τις υδρολογικές συνθήκες της περιοχής. Επιπλέον περιγράφονται τα στάδια κατασκευής, τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης που χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή του έργου και παρουσιάζεται η φιλοσοφία και οι αρχές σχεδιασμού με βάση τις οποίες γίνεται η μελέτη της ευστάθειας των σήραγγων για διαφορετικές συνθήκες στρωματογραφίας στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Ο βασικός κορμός της εργασίας χωρίζεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο γίνεται η ανάλυση για ανυποστήρικτη σήραγγα προκειμένου να σχεδιαστεί η καμπύλη αντίδρασης της βραχώμαζας. Στο δεύτερο στάδιο της εργασίας γίνεται η ανάλυση ευστάθειας για μονή και δίδυμη σήραγγα προσομοιώνοντας τα διάφορα στάδια εκσκαφής και υποστήριξης για διαφορετικές κατηγορίες βραχώμαζας και εδαφικών στρώσεων. Στη συνέχεια, γίνονται αναλύσεις λαμβάνοντας υπόψη σεισμικές συνθήκες.

Τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις που διεξήχθησαν.

Modeling of tunneling and stability analysis under the influence of stratigraphy using numerical methods of finite elements and finite differences

Geramani Eleftheria, Pitsiougka Eirini

Department of Civil Engineering, University of Thessaly, 2018

Supervisor: George Efremidis, Assistant Professor

Abstract

This diploma thesis deals with the simulation of single and twin tunneling, the temporary support measures used and the effect of stratigraphy using the FLAC 7.0 and PHASE2 8.0 programs. It also deals with the parametric analysis of the stability of the structure by altering the mechanical properties of the surrounding rock mass and the stratification of the area.

The tunnel used as reference is the tunnel of Ieropigi, which is part of the project "Vertical axis of Egnatia road Siatista - Kristalopigi: Koromilia-Kristalopigi section", which was implemented by Egnatia Odos SA. The first chapters present general information on the tunnel and the area constructed. These data refer to the geotectonic structure and hydrological conditions of the area. In addition, the construction stages, the temporary support measures used in the construction of the project are described, and the philosophy and design principles are presented, on the basis of which the study of the stability of the tunnels in different stratigraphy conditions is presented in the context of this thesis.

The main body of the study is divided into two parts. In the first part of the study, the unsupported tunnel is simulated in order to plan the ground response curve. The second stage is the analysis of stability for single and twin tunnels, simulating the various stages of excavation and support for different types of rock masses and soil layers. Afterwards, seismic conditions are analyzed.

Finally, the results and the conclusions of the analysis are presented.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.	Εισαγωγή.....	19
1.1	Γενικές πληροφορίες για την σήραγγα Ιεροπηγής	19
2.	Μέθοδοι Κατασκευής Σηράγγων	21
2.1	Παράγοντες που επηρεάζουν την κατασκευή σηράγγων	21
2.2	Μέθοδοι διάνοιξης σηράγγων	22
2.3	Νέα Αυστριακή Μέθοδος Διάνοιξης Σηράγγων	24
2.3.1	Γενικά	24
2.3.2	Χαρακτηριστικά της μεθόδου NATM	25
2.3.3	Φάσεις εκσκαφής.....	29
2.3.4	Παρακολούθηση της συμπεριφοράς σηράγγων	31
2.3.5	Πλεονεκτήματα της μεθόδου NATM	31
3.	Αριθμητικές μέθοδοι στην γεωτεχνική μηχανική	32
3.1	Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων	33
3.2	Μέθοδος των Πεπερασμένων Διαφορών	33
3.3	Σήραγγες-Υπόγεια έργα	33
4.	Παραδοχές Σχεδιασμού	35
4.1	Γενικά.....	35
4.2	Γεωλογικές Συνθήκες Ευρύτερης Περιοχής	35
4.3	Τεκτονική	37
4.4	Υδρογεωλογικές συνθήκες	38
4.5	Σεισμικό καθεστώς	39
4.6	Γεωτεχνικές Παράμετροι Σχεδιασμού.....	39
4.7	Ανάλυση αρχικού εντατικού πεδίου	42
5.	Μεθοδολογία Σχεδιασμού Προσωρινής Υποστήριξης.....	44
5.1	Γενικές αρχές σχεδιασμού	44
5.2	Μέτρα προσωρινής υποστήριξης και στάδια κατασκευής	46
5.2.1	Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα	51
5.2.2	Αγκύρια Βράχου	52
5.2.3	Μεταλλικά Πλαίσια	52
6.	Βασικά Στοιχεία και Παράμετροι Προσομοίωσης.....	55

6.1	Προσομοίωση διάνοιξης σήραγγας πρόσβασης με χρήση των προγραμμάτων Flac 7.0 και Phase ² 8.0	55
6.1.1	Γενικά για το FLAC7.0	55
6.1.2	Γενικά για το PHASE ² 8.0	56
6.2	Κάνναβος.....	56
6.3	Γεωμετρία της διατομής.....	57
6.4	Συνοριακές Συνθήκες	58
6.5	Ιδιότητες υλικών.....	59
6.6	Εδαφικές στρώσεις που επιλέχθηκαν	63
6.7	Κριτήριο Αστοχίας.....	68
6.8	Εντατικό Πεδίο	68
7.	Προσομοίωση ανυποστήρικτης σήραγγας	69
7.1	Στάδια προσομοίωσης	70
8.	Προσομοίωση διάνοιξης της σήραγγας και τοποθέτηση των μέτρων άμεσης υποστήριξης 78	
8.1	Προσομοίωση των σταδίων εκσκαφής κατά την διάνοιξη της σήραγγας	78
8.2	Μέτρα Άμεσης Υποστήριξης	85
8.2.1	Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα	85
8.2.2	Αγκύρια Βράχου	87
8.2.3	Μεταλλικά Πλαίσια	88
8.3	Προσομοίωση των σταδίων τοποθέτησης των μέτρων άμεσης υποστήριξης	89
8.4	Προσομοίωση διάνοιξης δίδυμης σήραγγας	91
8.5	Προσομοίωση με σεισμικές συνθήκες	94
9.	Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Αναλύσεων	95
9.1	Γενικά.....	95
9.2	Αποτελέσματα ανάλυσης ανυποστήρικτης σήραγγας	96
9.2.1	Αποτελέσματα με χρήση του προγράμματος Flac 7.0.....	96
9.2.2	Αποτελέσματα με χρήση του προγράμματος Phase 8.0	106
9.3	Αποτελέσματα προσομοίωσης σήραγγας με τοποθέτηση των μέτρων άμεσης υποστήριξης 117	
9.3.1	Αποτελέσματα με χρήση του προγράμματος Flac 7.0.....	117
9.3.2	Αποτελέσματα με χρήση του προγράμματος Phase ² 8.0.....	139

9.4	Παραμετρική διερεύνηση με τοποθέτηση μέτρων υποστήριξης στο δάπεδο για κατηγορία εδάφους II.....	159
9.4.1	Αποτελέσματα με χρήση του προγράμματος Flac 7.0.....	159
9.4.2	Αποτελέσματα με χρήση του προγράμματος Phase ² 8.0.....	161
9.5	Αποτελέσματα προσομοίωσης δίδυμης σήραγγας	163
9.5.1	Αποτελέσματα με χρήση του προγράμματος Flac 7.0.....	163
9.5.2	Αποτελέσματα με χρήση του προγράμματος Phase ² 8.0.....	180
9.6	Αποτελέσματα προσομοίωσης με σεισμικές συνθήκες με χρήση του προγράμματος Phase ² 8.0	196
9.6.1	Ολικές μετατοπίσεις	196
9.6.2	Καταπόνηση μέτρων άμεσης υποστήριξης με σεισμικές συνθήκες	199
10.	Συμπεράσματα	202
10.1	Προσομοίωση ανυποστήρικτης σήραγγας.....	202
10.2	Προσομοίωση διάνοιξης σήραγγας με εφαρμογή μέτρων άμεσης υποστήριξης	203
10.3	Προσομοίωση διάνοιξης δίδυμης σήραγγας	204
10.4	Προσομοίωση διάνοιξης σήραγγας με σεισμικές συνθήκες	205
11.	Βιβλιογραφία / Ιστογραφία	207

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 5.1.	Φάσεις κατασκευής για κατηγορία τυπικής διατομής A.....	47
Πίνακας 5.2.	Σειρά φάσεων κατασκευής σε σχέση με το βήμα προχώρησης για κατηγορία A (Εγνατία οδός Α.Ε., 2011).....	48
Πίνακας 5.3.	Φάσεις κατασκευής για κατηγορία τυπικής διατομής B.....	49
Πίνακας 5.4.	Σειρά φάσεων κατασκευής σε σχέση με το βήμα προχώρησης (Εγνατία οδός Α.Ε., 2011)	50
Πίνακας 5.5.	Τεχνικά χαρακτηριστικά μεταλλικών πλαισίων	53
Πίνακας 6.1.	Εδαφικοί παράμετροι για την κατηγορία εδάφους I.....	63
Πίνακας 6.2.	Εδαφικοί παράμετροι για την κατηγορία εδάφους II	63
Πίνακας 6.3.	Εδαφικοί παράμετροι για την κατηγορία εδάφους II με 2-στρώματα	63
Πίνακας 6.4.	Εδαφικοί παράμετροι για την κατηγορία εδάφους II με 3-στρώματα	64
Πίνακας 6.5.	Εδαφικοί παράμετροι για την κατηγορία εδάφους II με 2-στρώματα υπό κλίση 26°.....	64
Πίνακας 6.6.	Εδαφικοί παράμετροι για την κατηγορία εδάφους II με 3-στρώματα υπό κλίση 26°.....	64

Πίνακας 7.1. Τιμές του συντελεστή χαλάρωσης για ανυποστήρικτη σήραγγα	72
Πίνακας 8.1. Ιδιότητες εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε κάθε στάδιο εκσκαφής στο Flac 7.0	85
Πίνακας 8.2. Βήματα προσομοίωσης εκσκαφής και προσωρινής υποστύλωσης για τις διατομές Α και Β (Εγνατία οδός Α.Ε., 2011)	89
Πίνακας 9.1. Ολικές μετατοπίσεις για όλες τις κατηγορίες	105
Πίνακας 9.2. Κρίσιμη πίεση και ακτίνα πλαστικοποίησης για όλες τις κατηγορίες	106
Πίνακας 9.3. Ολικές μετατοπίσεις για όλες τις κατηγορίες	115
Πίνακας 9.4. Κρίσιμη πίεση και ακτίνα πλαστικοποίησης για όλες τις κατηγορίες	116
Πίνακας 9.5. Μέγιστες μετατοπίσεις στην επιφάνεια του υπερκείμενου εδάφους	125
Πίνακας 9.6. Συγκλίσεις σε οροφή, δάπεδο και τοιχώματα	125
Πίνακας 9.7. Καταπονήσεις μέτρων άμεσης υποστήριξης για όλες τις κατηγορίες	138
Πίνακας 9.8. Ολικές μετατοπίσεις σε οροφή, δάπεδο και τοιχώματα για όλες τις κατηγορίες	145
Πίνακας 9.9. Καταπονήσεις των μέτρων άμεσης υποστήριξης για όλες τις κατηγορίες	155
Πίνακας 9.10. Συγκλίσεις οροφής, δαπέδου και τοιχωμάτων για όλες τις κατηγορίες	165
Πίνακας 9.11. Οριζόντιες μετατοπίσεις για όλες τις κατηγορίες	166
Πίνακας 9.12. Μέγιστες μετατοπίσεις στην επιφάνεια του εδάφους	168
Πίνακας 9.13. Ολικές μετατοπίσεις στην οροφή της σήραγγας	169
Πίνακας 9.14. Ολικές μετατοπίσεις στην οροφή της σήραγγας	169
Πίνακας 9.15. Καταπονήσεις μέτρων άμεσης υποστήριξης για όλες τις κατηγορίες	179
Πίνακας 9.16. Κατακόρυφες μετατοπίσεις σε οροφή, δάπεδο και τοιχώματα για δίδυμη σήραγγα για όλες τις κατηγορίες	182
Πίνακας 9.17. Οριζόντιες μετατοπίσεις στα τοιχώματα για δίδυμη σήραγγα για όλες τις κατηγορίες	184
Πίνακας 9.18. Ολικές μετατοπίσεις για όλες τις κατηγορίες	185
Πίνακας 9.19. Ολικές μετατοπίσεις για όλες τις κατηγορίες	185
Πίνακας 9.20. Ολικές μετατοπίσεις για μονή σήραγγα υπό σεισμική φόρτιση (όλες οι κατηγορίες)	198
Πίνακας 9.21. Ολικές μετατοπίσεις για δίδυμη σήραγγα υπό σεισμική φόρτιση (όλες οι κατηγορίες)	199
Πίνακας 9.22. Καταπόνηση μέτρων υποστήριξης υπό σεισμική φόρτιση – μονή σήραγγα	200
Πίνακας 9.23. Καταπόνηση μέτρων υποστήριξης υπό σεισμική φόρτιση – δίδυμη σήραγγα	201

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: Γεωγραφική θέση έργου	19
Σχήμα 1.2. Οριζοντιογραφία σήραγγας Ιεροπηγής (Εγνατία Οδός Α.Ε., 2011)	20
Σχήμα 2.2.1 : Μέθοδος Side-wall drifts. (www.dr-sauer.com)	30
Σχήμα 4.1. Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης της Μεσοελληνικής αύλακας και των γειτονικών της περιοχών με ταξινόμησή τους σύμφωνα με την παλαιογεωδυναμική τους θέση στα πλαίσια του εξελισσόμενου ορογενετικά τόξου των Ελληνίδων (Εγνατία οδός Α.Ε., 2011)	37
Σχήμα 4.2. Διάγραμμα δείκτη GSI για μολυσσικούς σχηματισμούς (Εγνατία οδός Α.Ε., 2011)	40
Σχήμα 4.3. Διάγραμμα δείκτη GSI (Εγνατία οδός Α.Ε., 2011)	41
Σχήμα 5.1. Βαθμιαία εκτόνωση των γεωστατικών τάσεων ως συνάρτηση της απόστασης από το μέτωπο (Καββαδάς, Μ., 2005)	44
Σχήμα 5.2. Καμπύλη Αντίδρασης Πετρώματος (Καββαδάς, Μ., 2005)	45
Σχήμα 5.3. Λεπτομέρεια σύνδεσης μεταλλικών πλαισίων (Εγνατία Οδός Α.Ε., 2011)	53
Σχήμα 5.4. Τυπική διατομή εκσκαφής κατηγορία Α (Εγνατία Οδός Α.Ε., 2011)	54
Σχήμα 5.5. Τυπική διατομή εκσκαφής κατηγορίας Β (Εγνατία Οδός Α.Ε., 2011)	54
Σχήμα 6.1. Διακριτοποίηση καννάβου στο πρόγραμμα Phase2 8.0	57
Σχήμα 6.2. Τυπική γεωμετρία μοντέλου προσομοίωσης μονής σήραγγας (Flac 7.0)	58
Σχήμα 6.3. Τυπική γεωμετρία μοντέλου προσομοίωσης μονής σήραγγας (Phase ² 8.0)	59
Σχήμα 7.1. Κώδικας relax-tractions	71
Σχήμα 7.2. Κώδικας GRC	71
Σχήμα 7.3 : Αποτόνωση βραχώμαζας για ανυποστήρικτη διατομή στο στάδιο 1	72
Σχήμα 7.4. Αποτόνωση βραχώμαζας για ανυποστήρικτη διατομή στο στάδιο 3	73
Σχήμα 7.5. Αποτόνωση βραχώμαζας για ανυποστήρικτη διατομή στο στάδιο 6	73
Σχήμα 7.6. Αποτόνωση βραχώμαζας για ανυποστήρικτη διατομή στο στάδιο 10	74
Σχήμα 7.7. Επιλογή συντελεστών αποτόνωσης για ανυποστήρικτη σήραγγα	75
Σχήμα 7.8. Αποτόνωση βραχώμαζας για ανυποστήρικτη διατομή στο στάδιο 1	75
Σχήμα 7.9. Αποτόνωση βραχώμαζας για ανυποστήρικτη διατομή στο στάδιο 3	76
Σχήμα 7.10. Αποτόνωση βραχώμαζας για ανυποστήρικτη διατομή στο στάδιο 6	76
Σχήμα 7.11. Αποτόνωση βραχώμαζας για ανυποστήρικτη διατομή στο στάδιο 10	77
Σχήμα 8.1. 1 ^ο στάδιο: γεωστατικό πεδίο	79
Σχήμα 8.2. 2 ^ο στάδιο: Αποτόνωση βραχώμαζας Α' Φάσης	80

Σχήμα 8.3. Ολοκλήρωση εκσκαφής και υποστήριξη Α΄Φάσης	80
Σχήμα 8.4. 7 ^ο στάδιο: Αποτόνωση βραχώμαζας Β΄Φάσης	80
Σχήμα 8.5. Ολοκλήρωση εκσκαφής και υποστήριξη Β΄ Φάσης.....	81
Σχήμα 8.6. 1 ^ο στάδιο: Γεωστατικό πεδίο	81
Σχήμα 8.7. 2 ^ο στάδιο: Αποτόνωση βραχώμαζας Α΄Φάσης	82
Σχήμα 8.8. Υποστήριξη Α΄Φάσης	82
Σχήμα 8.9. Ολοκλήρωση εκσκαφής Α΄Φάσης	83
Σχήμα 8.10. Αποτόνωση βραχώμαζας Β΄Φάσης	83
Σχήμα 8.11. Υποστήριξη εκσκαφής Β΄Φάσης.....	84
Σχήμα 8.12. Ολοκλήρωση εκσκαφής Β΄Φάσης	84
Σχήμα 8.13. Ιδιότητες εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε κάθε στάδιο εκσκαφής στο Phase ² 8.0	86
Σχήμα 8.14. Εισαγωγή και ιδιότητες αγκυρίων στο Flac 7.0.....	87
Σχήμα 8.15. Εισαγωγή αγκυρίων στο Phase ² 8.0.....	87
Σχήμα 8.16. Εισαγωγή μεταλλικών πλαισίων HEB στο Flac 7.0	88
Σχήμα 8.17. Εισαγωγή μεταλλικών πλαισίων στο Phase ² 8.0	88
Σχήμα 8.18. Απεικόνιση σταδίων κατασκευής και προσομοίωσης διδυμής σήραγγας με χρήση του προγράμματος Flac 7.0	93
Σχήμα 8.19. Προσομοίωση με σεισμό	94
Σχήμα 9.1. Καμπύλη αντίδρασης βραχώμαζας κατηγορία εδάφους I.....	97
Σχήμα 9.2. Ζώνη πλαστικοποίησης για την κατηγορία I.....	97
Σχήμα 9.3. Δείκτες πλαστικοποίησης στο Flac 7.0. Τα σύμβολα υποδεικνύουν διαρροή σε διάτμηση στο συγκεκριμένο στάδιο, διαρροή σε διάτμηση ή εφεκλισμο στο παρελθόν και τα στοιχεία έχουν επιστρέψει στην ελαστική περιοχή, διαρροή σε εφελκυσμό στο συγκεκριμένο στάδιο αντίστοιχα.	97
Σχήμα 9.4. Καμπύλη αντίδρασης βραχώμαζας κατηγορία εδάφους II	98
Σχήμα 9.5. Ζώνη πλαστικοποίησης για την κατηγορία II	99
Σχήμα 9.6. Καμπύλη αντίδρασης βραχώμαζας κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα)	100
Σχήμα 9.7: Ζώνη πλαστικοποίησης για την κατηγορία II (2- στρώματα).....	100
Σχήμα 9.8. Καμπύλη αντίδρασης βραχώμαζας κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα)	101
Σχήμα 9.9: Ζώνη πλαστικοποίησης για την κατηγορία II (3- στρώματα).....	102
Σχήμα 9.10. Καμπύλη αντίδρασης βραχώμαζας κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα υπο κλίση).....	103
Σχήμα 9.11. Ζώνη πλαστικοποίησης για την κατηγορία εδάφους II (2- στρώματα υπο κλίση).....	103

Σχήμα 9.12. Καμπύλη αντίδρασης βραχόμαζας για την κατηγορία εδάφους II (2- στρώματα υπο κλίση).....	104
Σχήμα 9.13. Ζώνη πλαστικοποίησης για την κατηγορία εδάφους II (3- στρώματα υπο κλίση).....	105
Σχήμα 9.14. Καμπύλη αντίδρασης βραχόμαζας κατηγορία εδάφους I	107
Σχήμα 9.15: Ζώνη πλαστικοποίησης για την κατηγορία εδάφους I	107
Σχήμα 9.16. Καμπύλη αντίδρασης βραχόμαζας κατηγορία εδάφους II	108
Σχήμα 9.17: Ζώνη πλαστικοποίησης για την κατηγορία εδάφους II	109
Σχήμα 9.18. Καμπύλη αντίδρασης βραχόμαζας κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα)	110
Σχήμα 9.19: Ζώνη πλαστικοποίησης για την κατηγορία εδάφους II (2- στρώματα).....	110
Σχήμα 9.20. Καμπύλη αντίδρασης βραχόμαζας κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα).....	111
Σχήμα 9.21: Ζώνη πλαστικοποίησης για την κατηγορία εδάφους II (3- στρώματα).....	112
Σχήμα 9.22. Καμπύλη αντίδρασης βραχόμαζας κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα υπο κλίση).....	113
Σχήμα 9.23. Ζώνη πλαστικοποίησης για την κατηγορία εδάφους II (2- στρώματα υπο κλίση).....	113
Σχήμα 9.24. Καμπύλη αντίδρασης βραχόμαζας κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα υπο κλίση).....	114
Σχήμα 9.25: Ζώνη πλαστικοποίησης για την κατηγορία εδάφους II (3- στρώματα υπο κλίση).....	115
Σχήμα 9.26. Κατακόρυφες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους I)	117
Σχήμα 9.27. Κατακόρυφες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II)	118
Σχήμα 9.28. Κατακόρυφες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II(2-στρώματα).....	118
Σχήμα 9.29. Κατακόρυφες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II(3-στρώματα).....	119
Σχήμα 9.30. Κατακόρυφες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα υπό κλίση).....	119
Σχήμα 9.31. Κατακόρυφες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II(3-στρώματα υπό κλίση).....	120
Σχήμα 9.32. Οριζόντιες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους I)	121
Σχήμα 9.33: Οριζόντιες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II)	121
Σχήμα 9.34. Οριζόντιες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα).....	122
Σχήμα 9.35. Οριζόντιες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα).....	122
Σχήμα 9.36. Οριζόντιες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα υπο κλίση)	123
Σχήμα 9.37. Οριζόντιες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα υπο κλίση)	123
Σχήμα 9.38. Ολικές μετατοπίσεις κατά την πλήρη εκσκαφή και προσωρινή υποστήριξη της σήραγγας	124
Σχήμα 9.39. Ολικές μετατοπίσεις στην επιφάνεια του υπερκείμενου εδάφους κατά την πλήρη εκσκαφή και προσωρινή υποστήριξη της σήραγγας.....	124

Σχήμα 9.40. Ζώνη πλαστικοποίησης μετά την εφαρμογή των μέτρων άμεσης υποστήριξης (Κατηγορία εδάφους I)	126
Σχήμα 9.41. Ζώνη πλαστικοποίησης μετά την εφαρμογή των μέτρων άμεσης υποστήριξης (Κατηγορία εδάφους II)	126
Σχήμα 9.42. Ζώνη πλαστικοποίησης μετά την εφαρμογή των μέτρων άμεσης υποστήριξης (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα)	127
Σχήμα 9.43. Ζώνη πλαστικοποίησης μετά την εφαρμογή των μέτρων άμεσης υποστήριξης (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα)	127
Σχήμα 9.45. Ζώνη πλαστικοποίησης μετά την εφαρμογή των μέτρων άμεσης υποστήριξης (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα υπο κλίση)	128
Σχήμα 9.44. Ζώνη πλαστικοποίησης μετά την εφαρμογή των μέτρων άμεσης υποστήριξης (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα υπο κλίση)	128
Σχήμα 9.46. Αξονικές δυνάμεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους I)	129
Σχήμα 9.47. Καμπτικές ροπές εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους I)	129
Σχήμα 9.48. Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων (Κατηγορία εδάφους I)	130
Σχήμα 9.49. Αξονικές δυνάμεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II)	130
Σχήμα 9.50. Καμπτικές ροπές εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II)	131
Σχήμα 9.51. Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων (Κατηγορία εδάφους II)	131
Σχήμα 9.52. Αξονικές δυνάμεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα)	132
Σχήμα 9.53. Καμπτικές ροπές εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα)	132
Σχήμα 9.54. Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα)	133
Σχήμα 9.55. Αξονικές δυνάμεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα)	133
Σχήμα 9.56. Καμπτικές ροπές εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα)	134
Σχήμα 9.57. Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα)	134
Σχήμα 9.58. Αξονικές δυνάμεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα υπό κλίση)	135
Σχήμα 9.59. Καμπτικές ροπές εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα υπό κλίση)	135
Σχήμα 9.60. Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα υπό κλίση)	136
Σχήμα 9.61. Αξονικές δυνάμεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα υπό κλίση)	136
Σχήμα 9.62. Καμπτικές ροπές εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα υπό κλίση)	137

Σχήμα 9.63 : Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα υπό κλίση)	137
Σχήμα 9.64. Κατακόρυφες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα)	140
Σχήμα 9.65. Κατακόρυφες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα)	140
Σχήμα 9.66. Κατακόρυφες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα υπό κλίση)	141
Σχήμα 9.67. Κατακόρυφες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα υπό κλίση)	141
Σχήμα 9.68. Οριζόντιες μετατοπίσεις (κατηγορία εδάφους I)	142
Σχήμα 9.69. Οριζόντιες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II)	142
Σχήμα 9.70. Οριζόντιες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα)	143
Σχήμα 9.71. Οριζόντιες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα)	143
Σχήμα 9.72. Οριζόντιες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα υπό κλίση)	144
Σχήμα 9.73. Οριζόντιες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα υπό κλίση)	144
Σχήμα 9.74. Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων (κατηγορία εδάφους I)	146
Σχήμα 9.75. Αξονικές δυνάμεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους I)	146
Σχήμα 9.76. Καμπτικές ροπές εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους I)	147
Σχήμα 9.77. Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων (Κατηγορία εδάφους II)	147
Σχήμα 9.78. Αξονικές δυνάμεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II)	148
Σχήμα 9.79. Καμπτικές ροπές εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II)	148
Σχήμα 9.80. Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα)	149
Σχήμα 9.81. Αξονικές δυνάμεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα)	149
Σχήμα 9.82. Καμπτικές ροπές εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα)	150
Σχήμα 9.83. Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα)	150
Σχήμα 9.84. Αξονικές δυνάμεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα)	151
Σχήμα 9.85. Καμπτικές ροπές εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα)	151
Σχήμα 9.86. Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα υπο κλίση)	152
Σχήμα 9.87. Αξονικές δυνάμεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα υπό κλίση)	152
Σχήμα 9.88. Καμπτικές ροπές εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα υπό κλίση)	153
Σχήμα 9.89. Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα υπο κλίση)	153

Σχήμα 9.90. Αξονικές δυνάμεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα υπό κλίση).....	154
Σχήμα 9.91. Καμπτικές ροπές εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα υπό κλίση).....	154
Σχήμα 9.92. Ζώνη πλαστικοποίησης μετά την εφαρμογή των μέτρων άμεσης υποστήριξης (Κατηγορία εδάφους I)	156
Σχήμα 9.93. Ζώνη πλαστικοποίησης μετά την εφαρμογή των μέτρων άμεσης υποστήριξης (Κατηγορία εδάφους II)	156
Σχήμα 9.94. Ζώνη πλαστικοποίησης μετά την εφαρμογή των μέτρων άμεσης υποστήριξης (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα)	157
Σχήμα 9.95. Ζώνη πλαστικοποίησης μετά την εφαρμογή των μέτρων άμεσης υποστήριξης (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα)	157
Σχήμα 9.96. Ζώνη πλαστικοποίησης μετά την εφαρμογή των μέτρων άμεσης υποστήριξης (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα υπό κλίση).....	158
Σχήμα 9.97. Ζώνη πλαστικοποίησης μετά την εφαρμογή των μέτρων άμεσης υποστήριξης (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα υπό κλίση).....	158
Σχήμα 9.98. Ζώνη πλαστικοποίησης μετά την εφαρμογή των μέτρων υποστήριξης στο δάπεδο	159
Σχήμα 9.99. Αξονικές δυνάμεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος	160
Σχήμα 9.100. Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων	160
Σχήμα 9.101. Ζώνη πλαστικοποίησης μετά την εφαρμογή των μέτρων υποστήριξης στο δάπεδο	161
Σχήμα 9.102. Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων	161
Σχήμα 9.103. Αξονικές δυνάμεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος	162
Σχήμα 9.104. Κατακόρυφες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους I)	163
Σχήμα 9.106. Κατακόρυφες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα)	164
Σχήμα 9.105. Κατακόρυφες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II)	164
Σχήμα 9.107. Κατακόρυφες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα).....	165
Σχήμα 9.108. Οριζόντιες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους I)	166
Σχήμα 9.109. Οριζόντιες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II)	167
Σχήμα 9.110. Οριζόντιες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα)	167
Σχήμα 9.111. Οριζόντιες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα)	168
Σχήμα 9.112. Χρονοϊστορία κατακόρυφης μετατόπισης στην οροφή κάθε κλάδου της δίδυμης σήραγγας (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα). Η πράσινη γραμμή αντιστοιχεί στον αριστερό κλάδο ,ενώ η μπλε στο δεξιό κλάδο.	170

Σχήμα 9.113. Χρονοϊστορία κατακόρυφης μετατόπισης στην οροφή κάθε κλάδου της δίδυμης σήραγγας (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα). Η πράσινη γραμμή αντιστοιχεί στον αριστερό κλάδο ,ενώ η μπλε στο δεξιό κλάδο.	170
Σχήμα 9.115. Ζώνη πλαστικοποίησης μετά την εφαρμογή των μέτρων άμεσης υποστήριξης (Κατηγορία εδάφους II).....	171
Σχήμα 9.114. Ζώνη πλαστικοποίησης μετά την εφαρμογή των μέτρων άμεσης υποστήριξης (Κατηγορία εδάφους I)	171
Σχήμα 9.116. Ζώνη πλαστικοποίησης μετά την εφαρμογή των μέτρων άμεσης υποστήριξης (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα).....	172
Σχήμα 9.117. Ζώνη πλαστικοποίησης μετά την εφαρμογή των μέτρων άμεσης υποστήριξης (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα).....	172
Σχήμα 9.118. Αξονικές δυνάμεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους I).....	173
Σχήμα 9.119. Καμπτικές ροπές εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους I).....	173
Σχήμα 9.120. Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων (Κατηγορία εδάφους I).....	174
Σχήμα 9.121. Αξονικές δυνάμεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II)	174
Σχήμα 9.122. Καμπτικές ροπές εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II)	175
Σχήμα 9.123. Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων (Κατηγορία εδάφους II)	175
Σχήμα 9.124. Αξονικές δυνάμεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα)	176
Σχήμα 9.125. Καμπτικές ροπές εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα)	176
Σχήμα 9.126. Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα)	177
Σχήμα 9.127. Αξονικές δυνάμεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα)	178
Σχήμα 9.128: Καμπτικές ροπές εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα)	178
Σχήμα 9.129 : Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα)	179
Σχήμα 9.130. Κατακόρυφες μετατοπίσεις (κατηγορία εδάφους I)	180
Σχήμα 9.131. Κατακόρυφες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II)	180
Σχήμα 9.132. Κατακόρυφες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα)	181
Σχήμα 9.133. Κατακόρυφες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα)	181
Σχήμα 9.134. Οριζόντιες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους I).....	182
Σχήμα 9.135. Οριζόντιες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II)	183
Σχήμα 9.136. Οριζόντιες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα)	183
Σχήμα 9.137. Οριζόντιες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα)	184

Σχήμα 9.138. εξέλιξη των ολικών μετατοπίσεων ανά στάδιο προσομοίωσης για την κατηγορία εδάφους II.....	189
Σχήμα 9.139. Ζώνη πλαστικοποίησης για κατηγορία εδάφους I.....	190
Σχήμα 9.140. Ζήνα πλαστικοποίησης για κατηγορία II.....	190
Σχήμα 9.141. Ζώνη πλαστικοποίησης για κατηγορία II (2-στρώματα)	191
Σχήμα 9.142. Ζώνη πλαστικοποίησης για κατηγορία II (3-στρώματα)	191
Σχήμα 9.143. Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων και καμπτικές ροπές εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους I)	192
Σχήμα 9.144. Αξονικές δυνάμεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους I).....	192
Σχήμα 9.145. . Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων και καμπτικές ροπές εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II)	193
Σχήμα 9.146. Αξονικές δυνάμεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II)	193
Σχήμα 9.147. Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων και καμπτικές ροπές εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα)	194
Σχήμα 9.148. Αξονικές δυνάμεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα)	194
Σχήμα 9.149. Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων και καμπτικές ροπές εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα)	195
Σχήμα 9.150. Αξονικές δυνάμεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα)	195
Σχήμα 9.151. Ολικές μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους I – μονή σήραγγα).....	196
Σχήμα 9.152. Ολικές μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II – μονή σήραγγα)	197
Σχήμα 9.153. Ολικές μετατοπίσεις (κατηγορία εδάφους I – δίδυμη σήραγγα)	197
Σχήμα 9.154. Ολικές μετατοπίσεις (κατηγορία εδάφους II – δίδυμη σήραγγα)	198
Σχήμα 9.155. Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων και καμπτικές ροπές εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II)	199
Σχήμα 9.156. Αξονικές δυνάμεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II)	200

1. Εισαγωγή

1.1 Γενικές πληροφορίες για την σήραγγα Ιεροπηγής

Η σήραγγα Ιεροπηγής εντάσσεται στο τμήμα 45.4 Κορομηλιά - Ιεροπηγή που αποτελεί το βόρειο τμήμα, μήκους 13,0 χλμ. περίπου, του Κάθετου Άξονα 45 «Σιάτιστα -Ιεροπηγή -Κρυσταλλοπηγή». Έχει διεύθυνση Δυτικά - Ανατολικά και διέρχεται από λοφοειδή έξαρση διεύθυνσης Βορράς – Νότος (Εγνατία Οδός Α.Ε., 2011).

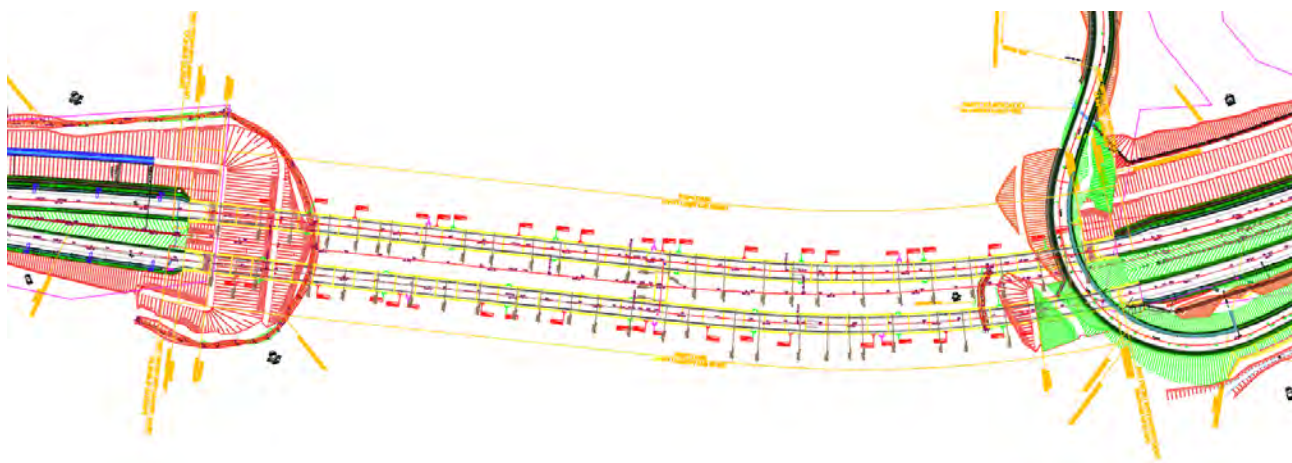
Ο κάθετος άξονας «Σιάτιστα -Ιεροπηγή -Κρυσταλλοπηγή» είναι τμήμα του Διευρωπαϊκού Δικτύου Μεταφορών εξασφαλίζοντας τη σύνδεση προς Pogradec-Cafasan- Δυρράχιο στο νότιο τμήμα της Αλβανίας και αποτελεί κλάδο του Πανευρωπαϊκού Διαδρόμου VIII (Εγνατία Οδός Α.Ε., 2011).



Σχήμα 1.1: Γεωγραφική θέση έργου

Η σήραγγα Ιεροπηγής είναι διπλής κατεύθυνσεως και συνίσταται από δύο κλάδους, ένα ανά κατεύθυνση. Οι άξονες των σηράγγων έχουν γενική διεύθυνση ΑΝΑ - ΔΒΔ και αναπτύσσονται οριζοντιογραφικά σε καμπύλα τμήματα. Η διατομή των σηράγγων είναι πεταλοειδής. Οι γεωμετρικές διαστάσεις της διατομής που χρησιμοποιήθηκαν καθορίζονται από το σχέδιο τυπικής διατομής σε ευθυγραμμία, στην οποία καθορίζεται επίσης και η εσωτερική διάταξη της.

Μεταξύ των χιλιομετρικών θέσεων αρχής σήραγγας και αρχής υπόγειου τμήματος και των χιλιομετρικών θέσεων πέρατος υπόγειου τμήματος και πέρατος σήραγγας, η κατασκευή πραγματοποιήθηκε με την τεχνική της ανοικτής εκσκαφής με επανεπίκρωση (Cut and Cover), ενώ ορύχθηκε υπογείως με χρήση συμβατικής μεθόδου-παραλλαγή της NATM (New Austrian Tunnelling Method). Το υπερκείμενο πάχος των βραχωδών σχηματισμών άνωθεν της ερυθράς είναι σχετικά περιορισμένο, με μέγιστη τιμή της τάξης των 45,0m.



Σχήμα 1.2. Οριζοντιογραφία σήραγγας Ιεροπηγής (Εγνατία Οδός Α.Ε., 2011)

2. Μέθοδοι Κατασκευής Σηράγγων

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει η περιγραφή των μεθόδων κατασκευής σηράγγων και των διαδικασιών εκσκαφής τους. Θα γίνει αναφορά στους παράγοντες που επηρεάζουν την κατασκευή σηράγγων, θα κατηγοριοποιηθεί η διάνοιξη των υπόγειων έργων σε ανοικτού και κλειστού τύπου εκσκαφές και θα αναλυθεί η διαδικασία διάνοιξης τους με τη μέθοδο NATM.

2.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την κατασκευή σηράγγων

Οι σήραγγες, αποτελούν υπόγεια τεχνικά έργα σε εδαφικούς και βραχώδεις σχηματισμούς όταν η ανοικτή εκσκαφή δεν είναι εφικτή. Είναι έργα που χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής από πλευράς μηχανικού, όμως είναι άρρηκτα συνδεδεμένα (όσο κανένα άλλο τεχνικό έργο) με τις τεχνικογεωλογικές και γεωτεκτονικές συνθήκες του χώρου διέλευσης, από το στάδιο σχεδιασμού του έργου μέχρι και αυτού της λειτουργίας του, καθώς οι παράγοντες μεθόδου κατασκευής εξαρτώνται από (Ρόζος, 1989):

- τις γεωτεκτονικές συνθήκες (γεωλογία – τεκτονική) και
- το μήκος της σήραγγας.

Συνεπώς οι γεωλογικές συνθήκες μαζί με την τεκτονική αποτελούν πρωταρχικούς παράγοντες στο σχεδιασμό και την κατασκευή των σηράγγων, αφού η γεωμάζα σε αντίθεση με άλλες κατασκευές επιφέρει τις διάφορες φορτίσεις στη σήραγγα, ενώ παράλληλα προσφέρεται σαν το αρχικό μέσο υποστήριξης. Καθώς δηλαδή η εκσκαφή προχωρεί, η αντοχή των σχηματισμών συνήθως κρατά τη σήραγγα ανοικτή για το αναγκαίο διάστημα εγκατάστασης της υποστήριξης. Άρα, οι εδαφικοί ή βραχώδεις γεωλογικοί σχηματισμοί που περιβάλλουν μια σήραγγα αποτελούν κατά κάποιο τρόπο υλικό κατασκευής, του οποίου οι γεωμηχανικές ιδιότητες (όπως και του χάλυβα και του σκυροδέματος που χρησιμοποιείται) είναι σημαντικές. Αναγκαία είναι λοιπόν η διερεύνηση των τεχνικογεωλογικών και υδρογεωλογικών συνθηκών στην περιοχή κατασκευής, αφού βοηθά στον ορθολογικό σχεδιασμό του έργου για ασφάλεια και οικονομία.

Επομένως απαιτείται (Ρόζος, 1989):

- Η κατανόηση των γεωλογικών, υδρογεωλογικών και τεκτονικών συνθηκών (ζώνες μειζόνων ασυνεχειών, πτυχώσεις, επωθήσεις, εφιππεύσεις, λεπιώσεις) καθώς και της μικροτεκτονικής προκειμένου για βραχώμαζα (διαρρήξεις - διακλάσεις, άνοιγμα αυτών, πλήρωση, τραχύτητα, απόσταση) στην περιοχή.
- Ο εντοπισμός των διαφόρων γεωτεχνικών προβλημάτων, τα οποία μπορεί να υπάρχουν στην περιοχή και τα οποία μπορεί να επαναδραστηριοποιηθούν ή επιδεινωθούν με τις εργασίες κατασκευής.
- Η μελέτη των φυσικομηχανικών χαρακτηριστικών των διαφόρων γεωλογικών σχηματισμών που εμπλέκονται στο έργο.
- Η ομαδοποίηση των σχηματισμών από πλευράς γεωμηχανικής συμπεριφοράς σε ενότητες με ορισμένα εύρη παραμέτρων σχεδιασμού.
- Η προσαρμογή των μέτρων υποστήριξης στην εν γένει τεχνικογεωλογική και υδρογεωλογική συμπεριφορά (στις περισσότερες περιπτώσεις εξαρτάται από την κατάσταση κερματισμού, άρα την τεκτονική - μικροτεκτονική) των σχηματισμών.

2.2 Μέθοδοι διάνοιξης σιηράγγων

Ένας τρόπος ταξινόμησης των μεθόδων διάνοιξης σιηράγγων είναι ανάλογα με τον τρόπο διασφάλισης της ευστάθειας που χρησιμοποιεί η καθεμία πριν την εφαρμογή κάθε είδους υποστήριξης. Οι μέθοδοι διάνοιξης με την κατηγοριοποίηση αυτή χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες (Καββαδάς, 2005).

1. Μέθοδοι διάνοιξης με εφαρμογή πίεσης με μηχανικά μέσα στο μέτωπο, δηλαδή με μηχανήματα ολομέτωπης κοπής (TBM) επειδή κατά τη μέθοδο αυτή η κοπτική κεφαλή του μηχανήματος ασκεί πίεση επί του μετώπου εκσκαφής, π.χ. TBMs, SPB & EPB TBMs (Slurry Pressure Balance & Earth Pressure Balance TBMs).
2. Μέθοδοι διάνοιξης σιηράγγων με εκτεθειμένο το μέτωπο εκσκαφής, δηλαδή χωρίς την εφαρμογή πίεσης με μηχανικά μέσα, και με υποστήριξη των τοιχωμάτων της σήραγγας με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (απλό ή οπλισμένο) ή/και αγκύρια βράχου, π.χ. μέθοδος NATM.
3. Μέθοδοι διάνοιξης με προστατευτική ασπίδα (shield), επειδή η άμεση υποστήριξη του τοιχώματος της σήραγγας γίνεται μέσω της ασπίδας και όχι

με εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος ή αγκυρίων, π.χ. δοκοί προπορείας.

4. Οποιαδήποτε άλλη μέθοδος διάνοιξης κατά την οποία η άμεση υποστήριξη του τοιχώματος της σήραγγας γίνεται χωρίς εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ή αγκύρια, όπως π.χ. με έγχυτο σκυρόδεμα, προκατασκευασμένα στοιχεία από σκυρόδεμα, μέταλλο ή άλλο υλικό.

Κατηγοριοποίηση ανάλογη με τον τύπο κατασκευής των υπόγειων έργων περιγράφεται στη συνέχεια. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι κατασκευής υπογείων έργων (Μαραγκός, 1997):

α) Ανοικτού τύπου - Η διάνοιξη σηράγγων κατά τον ανοικτό τύπο κατασκευής, αναφέρεται στην εκσκαφή, η οποία πραγματοποιείται από την επιφάνεια του εδάφους και η μέθοδος εκσκαφής είναι γνωστή ως μέθοδος κοπής και επίχωσης (cut and cover method).

β) Κλειστού τύπου - Η διάνοιξη σηράγγων κατά τον κλειστό τύπο κατασκευής αφορά την υπόγεια εκσκαφή και οι μέθοδοι εκσκαφής για τις κατασκευές κλειστού τύπου χωρίζονται σε μεθόδους ανατίναξης και μηχανικής όρυξης, όπως περιγράφονται στη συνέχεια:

1. Μέθοδοι διάτρησης-ανατίναξης,

2. Μέθοδοι μηχανικής όρυξης:

- Μέθοδοι σημειακής κοπής,
- Μέθοδοι ολομέτωπης κοπής.

Η δεύτερη εκ των ως άνω μεθόδων κατασκευής υπόγειων έργων χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο σε αστικές περιοχές κυρίως εξαιτίας της μικρότερων επιδράσεων - οχλήσεων που προκαλεί στο κυκλοφοριακό δίκτυο και στην καθημερινή ζωή των πολιτών. Είναι δυνατόν να εφαρμοσθεί στους περισσότερους τύπους εδαφών όταν το βάθος εκσκαφής είναι σημαντικό και σχεδόν πάντοτε όταν η διάνοιξη πραγματοποιείται σε βραχώδες υλικό.

Οι κυριότεροι τρόποι διάνοιξης υπόγειου έργου με τη μέθοδο της κλειστής διάνοιξης είναι οι εξής:

- Ο συμβατικός τρόπος (Νέα Αυστριακή Μέθοδος Διάνοιξης),
- Η κατασκευή του έργου με μηχανές ολομέτωπης διάνοιξης (TBM).

2.3 Νέα Αυστριακή Μέθοδος Διάνοιξης Σηράγγων

2.3.1 Γενικά

Η λεγόμενη "Νέα Αυστριακή Μέθοδος Διάνοιξης Σηράγγων" (New Austrian Tunneling Method - NATM) ουσιαστικά δεν αποτελεί μια "μέθοδο" αλλά περιλαμβάνει ένα σύνολο τεχνικών διάνοιξης και υποστήριξης σηράγγων, οι οποίες εφαρμόστηκαν συστηματικά κατά τη διάνοιξη σηράγγων στις Αυστριακές Άλπεις στις αρχές της δεκαετίας του 1960. Οι τεχνικές αυτές είχαν εφαρμοσθεί και πριν το 1960 τόσο στην Αυστρία όσο και σε άλλα μέρη του κόσμου αλλά η συστηματοποίηση και ονομασία τους (NATM) έγινε από Αυστριακούς Μηχανικούς (Rabcewicz, Mueller, Brunner και Pacher) το 1960. Έτσι, αν και η "Μέθοδος NATM" όταν προτάθηκε δεν ήταν ούτε "Νέα" ούτε "Αυστριακή" (αφού είχε εφαρμοσθεί και στο παρελθόν σε άλλες χώρες) αλλά ούτε και "Μέθοδος" (αφού ουσιαστικά αποτελείται από ένα σύνολο τεχνικών οι οποίες μάλιστα αλλάζουν με την πρόοδο της τεχνολογίας), διατήρησε διεθνώς μέχρι σήμερα το όνομά της (Καββαδάς, 2005).

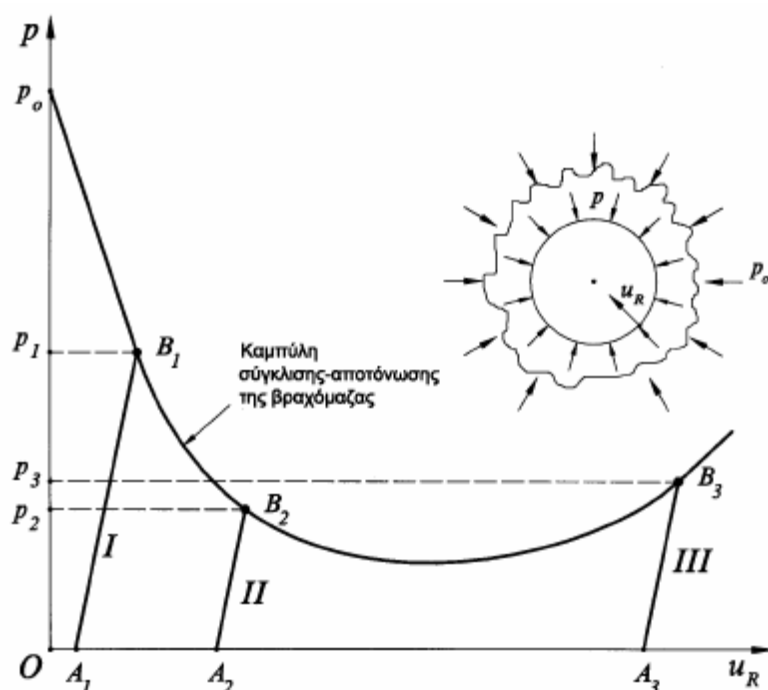
Αν και δεν υπάρχει γενικώς αποδεκτός ορισμός της "Μεθόδου NATM", ο όρος συνήθως χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη διάνοιξη σηράγγων με εκτεθειμένο το μέτωπο εκσκαφής (δηλαδή χωρίς την εφαρμογή πίεσης με μηχανικά μέσα) και υποστήριξη του τοιχώματος της σήραγγας με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (απλό ή οπλισμένο) ή/και αγκύρια βράχου (Καββαδάς, 2005).

Η συνήθης εφαρμογή της μεθόδου NATM είναι η διάνοιξη της διατομής της σήραγγας σε μια ή περισσότερες φάσεις και η άμεση υποστήριξη του τοιχώματος με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (απλό, ινοπλισμένο, οπλισμένο με χαλύβδινο πλέγμα ή ενισχυμένο με χαλύβδινες νευρώσεις από ράβδους ή διατομές I) και αγκύρια (παθητικά ή προεντεταμένα). Σημειώνεται ότι η υποστήριξη του τοιχώματος της σήραγγας μόνον με αγκύρια χωρίς εκτοξευόμενο σκυρόδεμα υπάγεται επίσης στην

κατηγορία της μεθόδου NATM. Τέλος, κατά τη μέθοδο NATM η ως άνω άμεση υποστήριξη συνήθως ακολουθείται σε μεταγενέστερο χρόνο από την κατασκευή της "τελικής επένδυσης" της σήραγγας η οποία θεωρείται ως φέρον στοιχείο. (Σε ορισμένες περιπτώσεις δεν κατασκευάζεται τελική επένδυση αλλά η άμεση υποστήριξη σχεδιάζεται ώστε να αναλάβει το σύνολο των φορτίων της περιβάλλουσας βραχώμαζας), (Καββαδάς, 2005).

2.3.2 Χαρακτηριστικά της μεθόδου NATM

Η βασική αρχή της μεθόδου NATM είναι ότι η διάνοιξη της σήραγγας και η κατασκευή της άμεσης υποστήριξης γίνονται κατά τρόπο ώστε να ενεργοποιηθεί η αντοχή της περιβάλλουσας βραχώμαζας (μέσω της ελεγχόμενης σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας) σε ικανό βαθμό ώστε να μειωθούν αρκετά οι πιέσεις επί της άμεσης υποστήριξης αλλά όχι τόσο ώστε να προκληθεί αποδιοργάνωση της βραχώμαζας με συνέπεια την αύξηση των πιέσεων στην άμεση υποστήριξη και τελικώς την κατάρρευση της διατομής της σήραγγας (βλέπε Σχήμα 2.1).



Σχήμα 2.1 : Επιρροή του χρόνου τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης στην πίεση της βραχώμαζας επί της υποστήριξης της σήραγγας. I) Πολύ νωρίς. Η πίεση στην άμεση υποστήριξη είναι πολύ μεγάλη, II) Κανονικός χρόνος κατασκευής της άμεσης υποστήριξης. Η πίεση έχει μειωθεί σημαντικά, III) Πολύ αργά. Η πίεση

έχει αυξηθεί λόγω αποδιοργάνωσης της βραχύμαζας με συνέπεια τον κίνδυνο κατάρρευσης, (Καββαδάς, 2005).

Δεδομένου ότι ένα σημαντικό ποσοστό της σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας συμβαίνει εμπρός από το μέτωπο εκσκαφής (δηλαδή πριν η εκσκαφή φθάσει στη συγκεκριμένη θέση) και επιπλέον ότι η σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας αυξάνει με ταχείς ρυθμούς στην περιοχή του μετώπου εκσκαφής, προκύπτει ότι στις περισσότερες περιπτώσεις η αντοχή της βραχύμαζας έχει ενεργοποιηθεί επαρκώς πολύ κοντά στο μέτωπο της εκσκαφής και συνεπώς η άμεση υποστήριξη θα πρέπει να κατασκευασθεί κατά το δυνατόν πλησιέστερα στο μέτωπο εκσκαφής.

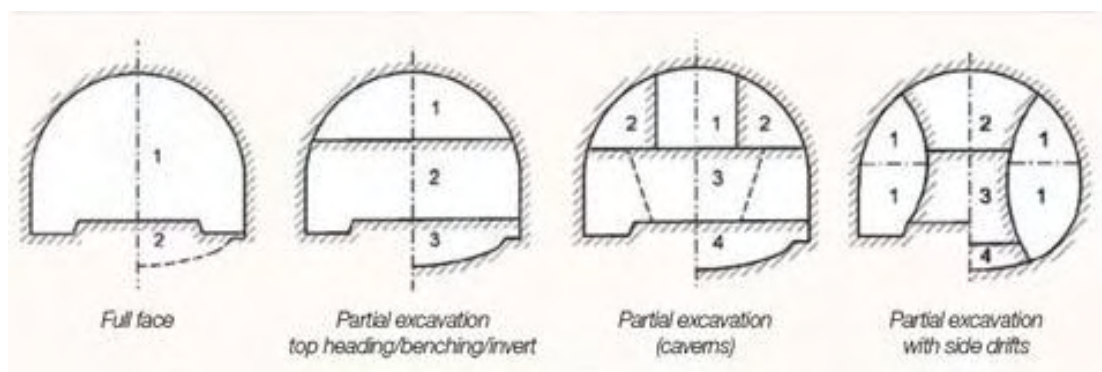
Η παραπάνω αρχή της μεθόδου NATM εξειδικεύεται ως εξής (Καββαδάς, 2005):

1. Η εκσκαφή της διατομής της σήραγγας συνήθως γίνεται σε περισσότερες της μιας φάσεις. Τυπικές περιπτώσεις φαίνονται στο σχήμα 2.2. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται η επιφάνεια του μετώπου της εκσκαφής κάθε φάσης και συνεπώς μειώνεται η συνολική σύγκλιση του τοιχώματος (σε σχέση με την εκσκαφή της διατομής σε μια φάση) και βελτιώνεται η ευστάθεια της διατομής αποφεύγοντας την αποδιοργάνωση της περιβάλλουσας βραχύμαζας.
2. Κατασκευή της άμεσης υποστήριξης της διατομής σε μικρή απόσταση από το μέτωπο της εκσκαφής ώστε να περιορισθεί η περαιτέρω σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας και να αποφευχθεί η αποδιοργάνωση της δομής της βραχύμαζας. Τούτο επιτυγχάνεται με την προώθηση της κάθε φάσης εκσκαφής σε μικρά βήματα της τάξεως των 1-2 μέτρων αναλόγως της ποιότητας της βραχύμαζας. Το μήκος του βήματος εκσκαφής μειώνεται όσο πτωχότερη είναι η ποιότητα της βραχύμαζας (επειδή στις περιπτώσεις αυτές η αποδιοργάνωση της δομής της βραχύμαζας είναι ταχύτερη).
3. Η άμεση υποστήριξη της διατομής θα πρέπει να αναλάβει φορτία κατά το δυνατόν ταχύτερα ώστε να περιορισθεί η περαιτέρω σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας και συνεπώς η αποδιοργάνωση της δομής της βραχύμαζας. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πλεονεκτεί ως προς την άποψη αυτή επειδή βρίσκεται σε απόλυτη επαφή με την περιβάλλουσα βραχύμαζα (και συνεπώς η παραμικρή

σύγκλιση του τοιχώματος προκαλεί τη φόρτισή του) και επιπλέον έχει μικρό χρόνο πήξεως (μερικές ώρες). Η χρήση αγκυρίων βράχου σε κανονικό κάναβο οπλίζει την περιβάλλουσα βραχόμαζα και συντελεί στην καλύτερη ανάπτυξη της λειτουργίας τόξου στη βραχόμαζα. Πράγματι, η τάση της βραχόμαζας να παραμορφωθεί διατμητικά προκαλεί (μέσω της διασταλτικότητας) την ανάπτυξη εφελκυσμού στα αγκύρια και συνεπώς θλίψης στη βραχόμαζα. Η θλίψη της βραχόμαζας αυξάνει την αντοχή της και μειώνει την παραμορφωσιμότητά της λόγω εγκιβωτισμού (λειτουργία ανάλογη με αυτή του σπειροειδούς οπλισμού στα υποστηλώματα).

4. Ολοκλήρωση του δακτυλίου του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στο σύνολο της διατομής (δηλαδή και στο δάπεδο). Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ένας κλειστός δακτύλιος με πολύ μικρή παραμορφωσιμότητα ώστε να περιορίζονται οι περαιτέρω συγκλίσεις του τοιχώματος. Η δημιουργία κλειστού δακτυλίου με την ταχεία σκυροδέτηση του δαπέδου (early invert closure) συντελεί τα μέγιστα στη μείωση της σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας και στην ευστάθεια της διατομής. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση βραχόμαζας με καλά μηχανικά χαρακτηριστικά συχνά δεν είναι απαραίτητο να ολοκληρώνεται ο δακτύλιος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, δηλαδή δεν επενδύεται με σκυρόδεμα το δάπεδο της σήραγγας.
5. Στην περίπτωση διάνοιξης σιράγγων σε βραχόμαζα με πολύ πτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά ή σε εδαφικούς σχηματισμούς, είναι συνήθης η εμφάνιση φαινομένων αστάθειας του μετώπου της εκσκαφής (face instability). Τα φαινόμενα αυτά προκαλούν αύξηση της σύγκλισης και αποδιοργάνωση της δομής της βραχόμαζας με πιθανή κατάληξη την κατάρρευση της σήραγγας. Σε τέτοιες περιπτώσεις μπορούν να ληφθούν μέτρα βελτίωσης της ευστάθειας του μετώπου, όπως αύξηση του αριθμού των φάσεων εκσκαφής (ώστε να μειωθούν οι διαστάσεις του μετώπου), διαμόρφωση του μετώπου με κλίση ως προς την κατακόρυφο (δηλαδή αφήνοντας έναν εδαφικό τάκο στον πόδα του μετώπου), ενίσχυση του μετώπου με αγκύρια, ενίσχυση της οροφής με ράβδους (spiles) ή δοκούς προπορείας (forepoling), κατασκευή τσιμεντενέσεων, επένδυση του μετώπου με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κλπ.

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



Σχήμα 2.2 : Τυπικές διατομές εκσκαφής με τη μέθοδο NATM (www.railsystem.net/natm/, 2018)

Λόγω της μεθόδου, ο σχεδιασμός της διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης της σήραγγας θα πρέπει να είναι ευπροσάρμοστος στις επιτόπου συνθήκες. Για το σκοπό αυτό ο σχεδιασμός γίνεται ως εξής (Καββαδάς, 2005):

1. Με βάση τα αποτελέσματα των γεωτεχνικών ερευνών η βραχώμαζα που αναμένεται να συναντηθεί κατά μήκος της σήραγγας κατατάσσεται σε 3-5 κατηγορίες (με βάση τα μηχανικά χαρακτηριστικά). Οι κατηγορίες αυτές συνήθως βασίζονται στα γνωστά συστήματα κατατάξεως (RMR, GSI, Q).
2. Μορφώνονται 3-5 τυπικές διατομές διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης της σήραγγας οι οποίες διαφέρουν ως προς το είδος των μέτρων υποστήριξης (π.χ. εάν διαθέτουν ενίσχυση με χαλύβδινα πλαίσια) και την πυκνότητά τους (π.χ. διάσταση του κανάβου των αγκυρίων ή πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος). Οι τυπικές διατομές μπορεί να διαφέρουν και ως προς τον

αριθμό των φάσεων εκσκαφής. Κατά τη μόρφωση των διατομών λαμβάνεται υπόψη ότι θα πρέπει να είναι κατασκευαστικά δυνατή η αλλαγή της διατομής της σήραγγας από τον ένα τύπο στον άλλο με σχετική ευχέρεια.

3. Διατυπώνεται ένα σύνολο κριτηρίων με βάση τα οποία θα είναι δυνατή η επιλογή της εφαρμοστέας τυπικής διατομής κατά την κατασκευή της σήραγγας. Τα κριτήρια αυτά συνήθως βασίζονται σε ένα συνδυασμό παραγόντων όπως η ποιότητα της βραχώμαζας, το πάχος των υπερκειμένων γαιών, ο προσανατολισμός των ασυνεχειών της βραχώμαζας, τα αποτελέσματα των μετρήσεων συμπεριφοράς του έργου σε προηγούμενες διατομές ή σε προηγούμενη φάση εκσκαφής στη συγκεκριμένη θέση κλπ.

2.3.3 Φάσεις εκσκαφής

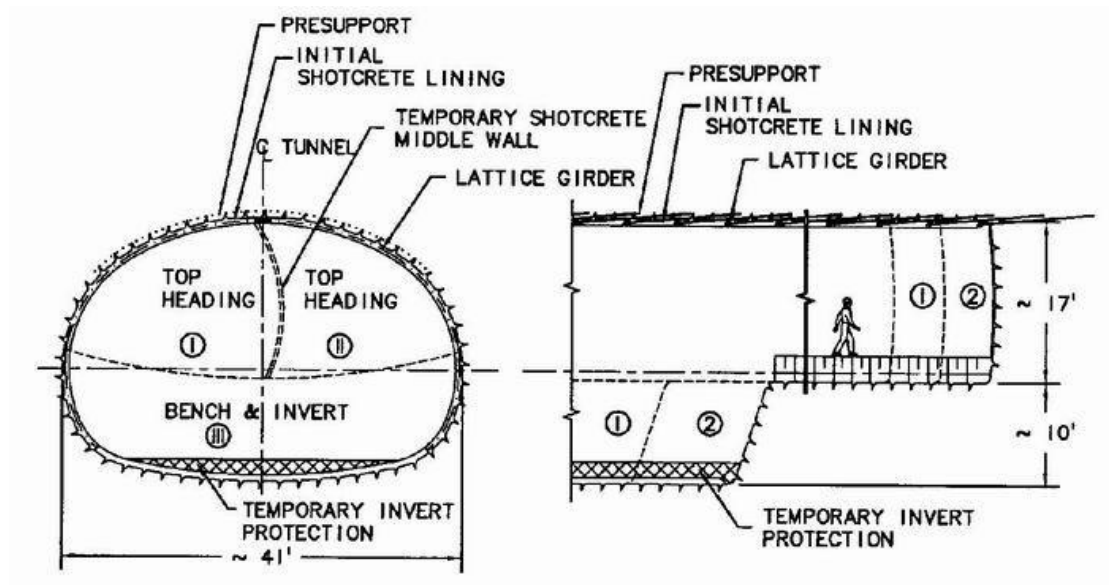
Η εκσκαφή σιηράγγων με τη μέθοδο NATM συνήθως γίνεται σε περισσότερες της μιας φάσεις. Τα κυριότερα συστήματα εκσκαφής είναι (Καββαδάς, 2005):

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

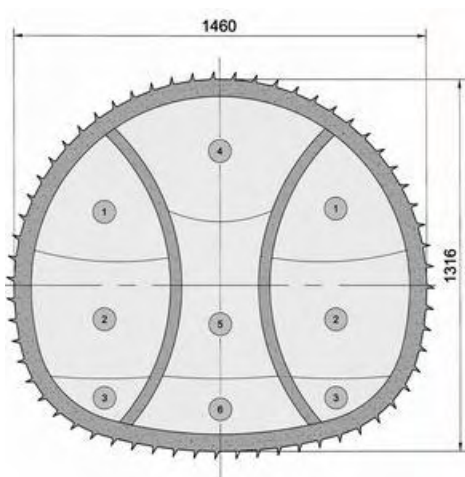
Η εκσκαφή της σήραγγας γίνεται από πάνω προς τα κάτω. Η πρώτη φάση εκσκαφής (top heading) μπορεί να εκσκαφεί και σε περισσότερες υποφάσεις κατά το πλάτος της σήραγγας. Στην περίπτωση αυτή η πρώτη φάση ουσιαστικά αποτελεί σήραγγα-πιλότο που χρησιμεύει και για τη διερεύνηση των συνθηκών που αναμένεται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

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

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



Σχήμα 2.3 : Μέθοδος Top Heading and Bench (www.dr-sauer.com)



Σχήμα 2.2.1 : Μέθοδος Side-wall drifts. (www.dr-sauer.com)

2.3.4 Παρακολούθηση της συμπεριφοράς σήραγγων

Η επιτυχής διάνοιξη και προσωρινή υποστήριξη σήραγγων με τη μέθοδο NATM βασίζεται σε σημαντικό βαθμό στη συστηματική παρακολούθηση της συμπεριφοράς της σήραγγας και στη συνεχή προσαρμογή των χαρακτηριστικών της διάνοιξης και υποστήριξης με βάση τα αποτελέσματα της παρακολούθησης (π.χ. τροποποίηση του βήματος εκσκαφής και της διαδικασίας τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης, πύκνωση ή αραίωση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης, τροποποίηση του πάχους του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, τροποποίηση του μήκους των αγκυρίων, προσθήκη αγκυρίων σε χαρακτηριστικές θέσεις κλπ). Η παρακολούθηση της συμπεριφοράς της σήραγγας γίνεται μέσω συστηματικών μετρήσεων και κατάλληλης αξιολόγησής (Καββαδάς, 2005).

Κατά τη διάνοιξη και υποστήριξη σήραγγων συνήθως μετρούνται τα εξής:

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

2.3.5 Πλεονεκτήματα της μεθόδου NATM

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου NATM σε σχέση με τις εναλλακτικές μεθόδους (διάνοιξη με TBM ή ασπίδα) είναι τα εξής (Καββαδάς, 2005)

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

3. Αριθμητικές μέθοδοι στην γεωτεχνική μηχανική

Η συνεχής εξέλιξη της τεχνολογίας οδηγεί στην πραγμάτωση έργων αυξανόμενης πολυπλοκότητας, κόστους και απαιτήσεων ασφαλείας. Η πλήρης και άμεση κατανόηση πολύπλοκων έργων με σύνθετα προβλήματα, τα οποία κυριαρχούνται ταυτόχρονα από σειρά πεπλεγμένων φαινομένων, είναι αδύνατη για το ανθρώπινο μυαλό. Το γεγονός αυτό έγινε ευθύς εξ αρχής σαφές στον κόσμο των μηχανικών, οι οποίοι εφάρμοσαν την αρχή της Ανάλυσης – Σύνθεσης για την κατανόηση και εν συνεχεία την επίλυση των προβλημάτων. Πρώτο στάδιο της μεθοδολογίας αποτελεί η Ανάλυση κάποιου φαινομένου ή σειράς συζευγμένων φαινομένων σε απλούστερα συστατικά στοιχεία, η κατανόηση της λειτουργίας τους και εν συνεχεία η αναζήτηση μαθηματικών μεθοδολογιών προσομοίωσης τους. Με τον τρόπο αυτό επιχειρείται η αναγωγή φυσικών και συνεχών προβλημάτων σε μαθηματικά και διακριτά (Κωμοδρόμος, 2008).

Η επανασύνθεση των επιμέρους συστατικών στοιχείων του γενικού οδηγεί μεν και πάλι σε πολυπλοκότητα, με τη διαφορά εντούτοις ότι το πρόβλημα πλέον είναι διακριτό και μαθηματικά επιλύσιμο. Οι αριθμητικές μέθοδοι αποτέλεσαν καρπό της ανάγκης υλοποίησης της μεθοδολογίας Ανάλυσης – Σύνθεσης και της μετάβασης από συστήματα συνεχή σε διακριτά, μετά από κατάλληλη διακριτοποίηση. Τα επιμέρους τμήματα του προβλήματος, μετά τη διακριτοποίηση και την αποσύζευξη συζευγμένων φαινομένων όπου χρειαστεί, μπορούν να προσομοιωθούν με καταστατικούς νόμους συμπεριφοράς (μαθηματικά προσομοιώματα), κατάλληλης μορφής για κάθε ειδική περίπτωση (Κωμοδρόμος, 2008).

Οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι στη γεωτεχνική μηχανική, είναι

- 1) Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών (finite difference method – FDM),
- 2) Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (finite element method – FEM),
- 3) Η μέθοδος των συνοριακών στοιχείων (boundary element method – BEM),
- 4) Η μέθοδος των διακριτών στοιχείων (discrete element method – DEM).

Οι πιο συνηθισμένες είναι οι 1) και 2) ενώ οι μέθοδοι των συνοριακών και διακριτών στοιχείων έχουν μεγάλες υπολογιστικές απαιτήσεις έτσι έχει προταθεί ο συνδυασμός τους με άλλες π.χ. FEM – DEM, όπου η DEM χρησιμοποιείται για την επίλυση της

συμπεριφοράς εδαφικού στοιχείου (στο σημείο ολοκλήρωσης), ενώ ο συνολικός φορέας επιλύεται με τη FEM.

3.1 Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων

Στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEM), ο υπό μελέτη χώρος διαιρείται σε επιμέρους τμήματα (πεπερασμένα στοιχεία). Οι διαστάσεις των στοιχείων αυτών εξαρτώνται από το μέγεθος του υπό μελέτη χώρου. Το κάθε στοιχείο αποτελείται από κόμβους και ένα στοιχείο μπορεί να έχει περισσότερους από τους ελάχιστους κόμβους. Η συμπεριφορά του κάθε τμήματος περιγράφεται μέσα από διαφορικές εξισώσεις. Εξασφαλίζοντας τις συνθήκες ισορροπίας και συνέχειας μεταξύ των στοιχείων αυτών, μπορεί να ληφθεί μια μοναδική λύση από το γραμμικό σύστημα των αλγεβρικών εξισώσεων (Εξαδάκτυλος Γ., Σταυροπούλου Μ., 2006).

3.2 Μέθοδος των Πεπερασμένων Διαφορών

Ο υπό μελέτη χώρος στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών (FDM) διαιρείται σε νοητά στοιχεία που σχηματίζουν έναν ομοιόμορφο κάνναβο. Σε αντιδιαστολή με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων το πεδίο δεν διαιρείται σε στοιχεία αλλά ορίζονται κόμβοι στους οποίους υπολογίζονται τα ζητούμενα μεγέθη. Η διαφορική εξίσωση εκφράζεται με βάση την τιμή της συνάρτησης σε κάθε σημείο του καννάβου, καθώς και τις παραγώγους της συνάρτησης γύρω από κάθε σημείο. Οι μέθοδοι πεπερασμένων διαφορών διακρίνονται ανάλογα με τον τρόπο υπολογισμού παραγώγων σε κάθε σημείο του καννάβου (forward, backward, κ.λπ.). Οι άγνωστες ποσότητες υπολογίζονται σε κάθε σημείο του καννάβου με επίλυση του αντίστοιχου αλγεβρικού συστήματος εξισώσεων (Εξαδάκτυλος Γ., Σταυροπούλου Μ., 2006).

3.3 Σήραγγες-Υπόγεια έργα

Το πρόβλημα της κατασκευής και του υπολογισμού των σιηράγγων και εν γένει των υπόγειων έργων είναι ιδιαίτερα σύνθετο, με πολλαπλές συνιστώσες και παραμέτρους, διαφορετικής και μεταβαλλόμενης δράσης. Η διάσταση του προβλήματος είναι χαρακτηριστική περίπτωση τρισδιάστατου προβλήματος, το περιβάλλον μέσο εμφανίζει κατά κανόνα μη γραμμική συμπεριφορά, ενώ το είδος, ο χρόνος και ο τρόπος τοποθέτησης των μέτρων άμεσης υποστήριξης μπορούν να μεταβάλλουν καθοριστικά τη συνολική απόκριση του προβλήματος (Κωμοδρόμος, 2008).

Η συνεχής ανάπτυξη των αριθμητικών μεθόδων (εξελεγμένοι καταστατικοί νόμοι συμπεριφοράς σε συνδυασμό με υπολογιστικά συστήματα μεγάλης ισχύος) επιτρέπει τη συνεχή βελτίωση προσέγγισης του προβλήματος, παρέχοντας τη δυνατότητα προσομοίωσης τόσο των διαφόρων κατασκευαστικών φάσεων (σταδιακή εκσκαφή), όσο και του είδους των επεμβάσεων (τοποθέτηση στοιχείων δοκού ή ράβδου με δυνατότητα ενεργοποίησης – απενεργοποίησης και επιβολή προέντασης κατά τις διάφορες φάσεις). Οι αριθμητικές μέθοδοι παρέχουν επίσης τη δυνατότητα παρακολούθησης της εντατικής και κινηματικής κατάστασης ή ακόμα και τις διαδρομές τάσεων στα σημεία ολοκλήρωσης και καταδεικνύουν με τον τρόπο αυτό τις ασθενέστερες ζώνες, όπου και αν χρειάζεται άμεση υποστήριξη, καθώς και τις πιθανές αυτοφερόμενες ζώνες όπου δεν απαιτείται λήψη ειδικών μέτρων υποστήριξης. Σε αυτή τη φάση, οι αναλύσεις πραγματοποιούνται, κατά κύριο λόγο, σε καθεστώς επίπεδης παραμόρφωσης, λαμβάνοντας εμμέσως υπόψη τον τρισδιάστατο χαρακτήρα του προβλήματος. Οι αναλύσεις στις τρεις διαστάσεις είναι χρονοβόρες και εισάγονται περιστασιακά μόνο στο πεδίο ανάλυσης. Ουσιαστικό πλεονέκτημα της αριθμητικής ανάλυσης σε καθεστώς επίπεδης παραμόρφωσης (ή ακόμα και τριών διαστάσεων), συνιστά η δυνατότητα διεξαγωγής αντίστροφης ανάλυσης. Η διαδικασία αυτή αποτελεί τη μόνη μεθοδολογία απόκτησης εμπειρίας σχετικά με την προσομοίωση – απόκριση της βραχύμαζας, η οποία προσδιορίζεται με εμπειρικές σχέσεις. Κατά τον τρόπο αυτό παρέχεται η δυνατότητα συνεχούς βελτίωσης της προσομοίωσης και της ακρίβειας των επιλύσεων με αποτέλεσμα την εξασφάλιση ικανοποιητικού βαθμού ασφαλείας με μικρότερο οικονομικό κόστος. Το τελευταίο αυτό πλεονέκτημα αποτελεί το κύριο κίνητρο ώθησης προς τη χρήση αριθμητικών μεθόδων στην ανάλυση και τον σχεδιασμό των σηράγγων, καθώς και πολλών βεβαίως άλλων γενικών και ειδικών έργων (Κωμοδρόμος, 2008).

4. Παραδοχές Σχεδιασμού

4.1 Γενικά

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζεται η φιλοσοφία και οι αρχές σχεδιασμού με βάση τις οποίες γίνεται η μελέτη της ευστάθειας των σηράγγων για διαφορετικές συνθήκες στρωματογραφίας στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας. Ο βασικός κορμός της εργασίας χωρίζεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο της εργασίας επιλέγεται να γίνει ανάλυση για ανυποστήρικτη σήραγγα προκειμένου να σχεδιαστεί η καμπύλη αντίδρασης της βραχώμαζας. Στο δεύτερο στάδιο της μελέτης γίνεται ανάλυση ευστάθειας για μονή και δίδυμη σήραγγα προσομοιώνοντας τα διάφορα στάδια εκσκαφής και υποστήριξης για διαφορετικές κατηγορίες βραχώμαζας και εδαφικών στρώσεων. Οι εδαφικοί και βραχώδεις παράμετροι που λήφθηκαν υπόψη για την προσομοίωση διάνοιξης των σηράγγων παρατίθενται στον πίνακα 4.2 της παραγράφου 4.6.

4.2 Γεωλογικές Συνθήκες Ευρύτερης Περιοχής

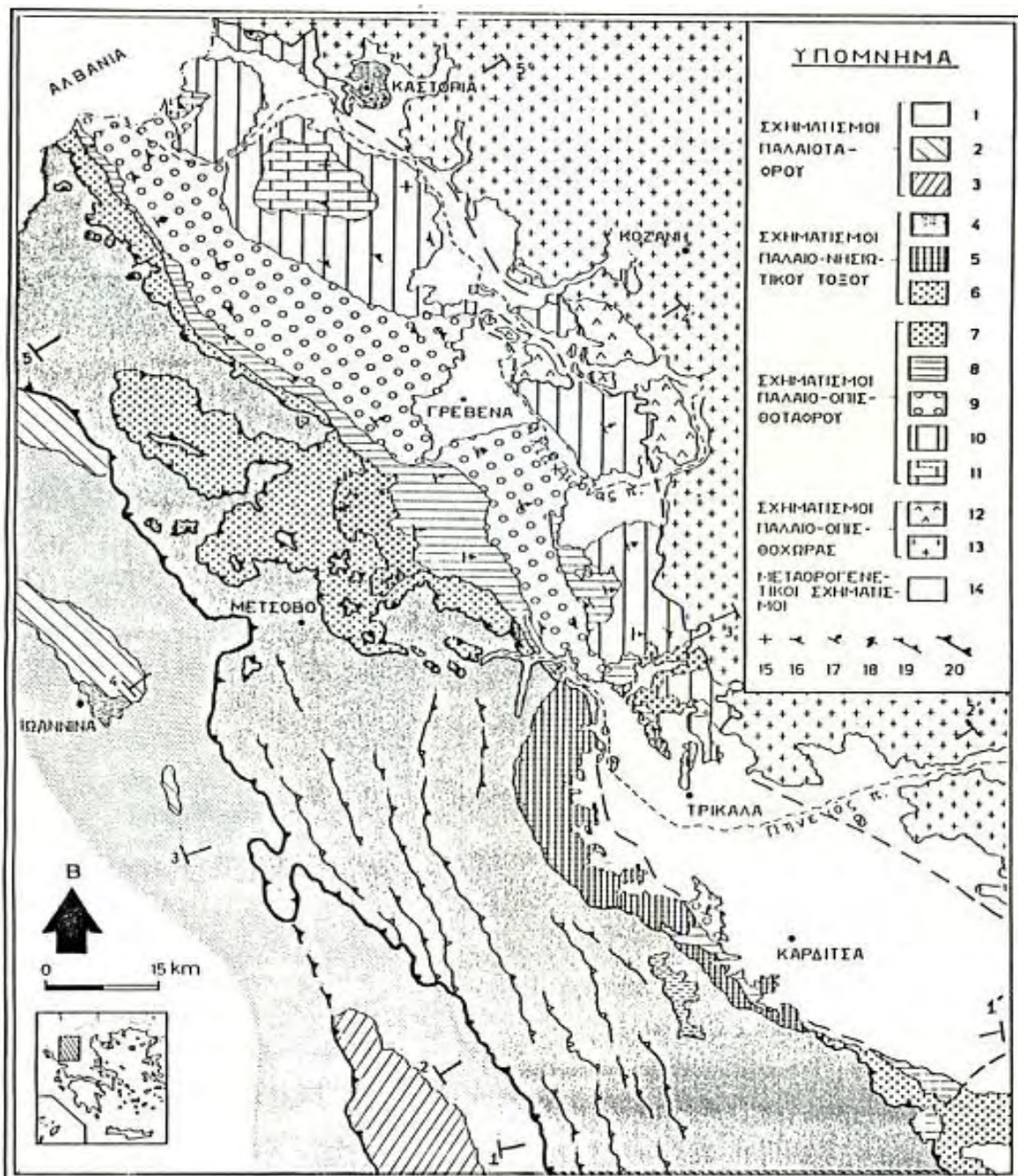
Στην ευρύτερη περιοχή απαντώνται Πλειο-Πλειστοκαινικά ιζήματα και οι σχηματισμοί της Μεσοελληνικής Αύλακας, οι οποίοι κατά θέσεις, επιφανειακά καλύπτονται από εδαφικό μανδύα αποσάθρωσης. Η Μεσοελληνική Αύλακα αποτελεί λεκάνη ιζηματογένεσης μήκους 130 χλμ και πλάτους 30 χλμ ή οποία αναπτύσσεται στην Κεντρική Ελλάδα (Γρεβενά) ενώ εκτείνεται μέχρι και την Αλβανία. Έχει ΒΒΔ-ΝΝΑ διεύθυνση ανάπτυξης, ανάμεσα στις εξωτερικές μη μεταμορφωμένες Ελληνίδες (Απούλια μικρο-πλάκα) και τις εσωτερικές μεταμορφωμένες ζώνες (Πελαγονικό ηπειρωτικό τέμαχος). Η λεκάνη χαρακτηρίζεται από τη σημαντική σε έκταση ανάπτυξη, το μεγάλο πάχος των ιζηματογενών σχηματισμών (περίπου έως 4 χιλιόμετρα σε κατακόρυφες τομές), τις πολύπλοκες δομές, τις πολυάριθμες μεταβολές στις ιζηματογενείς φάσεις και τα πάχη των αποθέσεων κατά μήκος και εγκάρσια του άξονα της λεκάνης. Οι ιζηματογενείς φάσεις περιλαμβάνουν δελταϊκά κροκαλοπαγή, αλλουβιακά κορήματα, ψαμμίτες και αργίλους υποθαλάσσιων ριπιδίων (τουρβιδίτες), δελταϊκούς και πλημμυρικού πεδίου, και αμμούχα ιζήματα υφαλοκρηπίδας. Όλα αυτά καθιστούν τη Μεσοελληνική Αύλακα ως τη μεγαλύτερη και πιο σημαντική λεκάνη του τελευταίου ορογενετικού σταδίου («μολασσικού-τύπου» λεκάνη) των Ελληνίδων. Κατά τη διάνοιξη της δίδυμης σήραγγας δεν συναντώνται οφιολιθικοί σχηματισμοί αλλά μολασσικοί.

Αναλυτικότερα οι ιζηματογενείς σχηματισμοί που συναντώνται στην περιοχή συνίστανται από Πλειό-Πλειστοκαινικές αποθέσεις (P1). Πρόκειται για ασύνδετους και χαλαρούς σχηματισμούς που αποτελούνται από ερυθροκάστανες αργίλους με ιλύ, άμμο και ολίγους χάλικες. Το πάχος του σχηματισμού, από τα στοιχεία των γεωτρήσεων είναι της τάξης των 10m (Εγνατία Οδός Α.Ε., 2011).

Οι μολασσικοί σχηματισμοί περιλαμβάνουν:

- Το ασβεστολιθικό κροκαλοπαγές (M-cg), που εμφανίζει προχωρημένο βαθμό συγκόλλησης προσδίδοντάς του χαρακτηριστικά βράχου. Το ασβεστολιθικό κροκαλοπαγές κλείνει τη μολασσική ακολουθία, ενώ επικάθεται ασύμφωνα τόσο πάνω από τους υπόλοιπους μολασσικούς σχηματισμούς, όσο και πάνω από τους οφιολίθους του υποβάθρου.
- Την εντελώς αποσθρωμένη μολάσση (M), η οποία εμφανίζεται ως παραμένον έδαφος (εδαφικός μανδύας αποσάθρωσης V-VI κατά ISRM). Πρόκειται για κοκκώδη χαλαρό σχηματισμό με κυμαινόμενο πάχος, το οποίο κατά θέσεις μπορεί να υπερβαίνει τα 2m
- Το ιλυολιθικό μέλος της μολασσικής σειράς (ιλυόλιθος - Si). Εντός των ιλυολίθων παρατηρούνται ενστρώσεις ψαμμιτών και ψηφιδοκροκαλοπαγών.
- Το ψαμμιτικό μέλος της μολασσικής σειράς (ψαμμίτες- St). Εντός των ψαμμιτών παρατηρούνται ενστρώσεις ιλυολίθων και ψηφιδοκροκαλοπαγών.
- Το ψηφιδοκροκαλοπαγές (Cg) πρόκειται για πολύμικτο σχηματισμό με μεταβλητό βαθμό συγκόλλησης που συνίσταται από καλά στρογγυλεμένες κροκάλες και ψηφίδες ποικίλης σύστασης σε αργιλοαμμώδες συνδετικό υλικό.
- Στην περιοχή της εξόδου της σήραγγας, σχηματιζόμενο στη θέση ρήγματος, απαντάται το τεκτονικό κροκαλοπαγές (tm), εμφανιζόμενο ως ερυθροκάστανο ψηφιδοκροκαλοπαγές με θραύσματα και ψηφίδες ποικίλου μεγέθους και σύστασης.

Το αλπικό υπόβαθρο της περιοχής εντάσσεται στην Πελαγονική ενότητα και συνίσταται από οφιολίθους (Oph) και σερπεντινωμένοι περιδοτίτες. Πρόκειται για υπερβασικά εκρηξιγενή πετρώματα με έντονο τεκτονισμό και προχωρημένη σερπεντινίωση που συνοδεύονται από μεταλλοφορία Νικελίου και Χρωμίου.



Σχήμα 4.1. Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης της Μεσοελληνικής αύλακας και των γειτονικών της περιοχών με ταξινόμησή τους σύμφωνα με την παλαιογεωδυναμική τους θέση στα πλαίσια του εξελισσόμενου ορογενετικά τόξου των Ελληνίδων (Εγνατία οδός Α.Ε., 2011)

4.3 Τεκτονική

Η ευρύτερη περιοχή του έργου χαρακτηρίζεται από τη ρηξιγενή τεκτονική του Νεογενούς, όπου κατά το ανώτερο Μειόκαινο επικράτησαν εφελκυστικές τάσεις με διεύθυνση ΒΒΑ-ΝΝΔ δημιουργώντας βυθίσματα με ρήγματα ΒΔ-ΝΑ διεύθυνσης ενώ κατά το Ανώτερο Πλειόκαινο

και Τεταρτογενές ΒΔ-ΝΑ εφελκυστικές τάσεις χώρισαν τα βυθίσματα αυτά σε επιμέρους λεκάνες που οριοθετούνται από ΒΑ-ΝΔ ρήγματα. Η δομή αυτή δείχνει την ύπαρξη μεγάλων εγκάρσιων ως προς την διεύθυνση της Αύλακας ρηξιτεμαχών που αποτελούν τεκτονικά δίτολα με ανύψωση των ΒΔ περιοχών και βύθιση των ΝΑ. Οι δύο αυτές κυρίαρχες κινήσεις εμφανίζονται και στην περιοχή του έργου, στην ευρύτερη περιοχή του στομίου εξόδου όπου εμφανίζονται ρήγματα με διεύθυνση ΒΒΑ-ΝΝΔ και εγκαρσίως ΒΔ-ΝΑ, πιθανόν σύγχρονα της μολασσογένεσης, δημιουργώντας ένα τεκτονικό βύθισμα απόθεσης του ασβεστολιθικού κροκαλοπαγούς (Εγνατία Οδός Α.Ε., 2011).

4.4 Υδρογεωλογικές συνθήκες

Το υπέδαφος κατά μήκος της σήραγγας παρουσιάζει μεταβαλλόμενες υδρογεωλογικές συνθήκες, οι οποίες καθιστούν το καθεστώς του υδροφόρου ορίζοντα ασαφές. Κατά μήκος της σήραγγας, στους μολασσικούς σχηματισμούς, λόγω της μεταβαλλόμενης περατότητας των συναντώμενων στρώσεων δεν υφίστανται ενιαίες υδρογεωλογικές συνθήκες. Ωστόσο η παρουσία υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα και επικρεμάμενων οριζόντων δεν μπορεί να αποκλειστεί (Εγνατία Οδός Α.Ε., 2011).

Το οφιολιθικό υπόβαθρο λόγω του κερματισμού αποτελεί σχηματισμό ημιπερατό έως μετρίως υδροπερατό. Τα αδροκλαστικά μέρη της μόλασσας όπως τα κροκαλοπαγή και οι ψαμμίτες είναι υδροπερατά έως ημιπερατά και επιτρέπουν τη συγκέντρωση υδάτων και τη δημιουργία αλλεπάλληλων υδροφόρων οριζόντων στην επαφή με τα υποκείμενα λεπτόκοκκα μέρη όπως οι ιλύολιθοι και οι λεπτόκοκκοι ψαμμίτες είναι γενικά αδιαπέρατα. Οι υδροφόροι αυτοί ορίζοντες βρίσκονται υπό πίεση. Οι πλειοπλειστοκαινικές αποθέσεις αποτελούνται κυρίως από αμμοχάλικα, άμμους και αργίλους και είναι επιλεκτικά υδροπερατές ή ημιπερατές και επιτρέπουν τη δημιουργία εποχικών ασθενών υδροφοριών, καθώς και συνεχούς ελεύθερου ορίζοντα (Εγνατία Οδός Α.Ε., 2011).

Δεδομένου ότι κατά τη διάρκεια εκσκαφής μιας σήραγγας εκτελείται συστηματική αποστράγγιση του ύδατος μέσω αποστραγγιστικών οπών στο μανδύα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος δε λήφθηκε υπόψη για τα μοντέλα προσομοίωσης φόρτιση λόγω υδροστατικής πίεσης στο σύστημα υποστήριξης.

4.5 Σεισμικό καθεστώς

Η ευρύτερη περιοχή του έργου χαρακτηριζόταν μέχρι το 1995 ως περιοχή ιδιαίτερα φτωχή σε σεισμούς. Στις 13/05/1995 σημειώθηκε ο γνωστός καταστροφικός σεισμός των Γρεβενών – Κοζάνης, ο μόνος γνωστός ιστορικός σεισμός μέχρι τότε ήταν ο σεισμός του 896μ.Χ. μεγέθους 6,0R που προκάλεσε την καταστροφή της πόλης της Βέροιας.

Ο σεισμός αυτός σχετίζεται με το γεωλογικό ρήγμα του Αλιάκμονα, το οποίο έχει διεύθυνση ΑΒΑ-ΔΝΔ και μήκος περίπου 30χλμ. Σύμφωνα με γεωλογικές εκτιμήσεις, το ρήγμα αυτό παρέμεινε ανενεργό για περίπου 2500 χρόνια. Στην πόλη της Κοζάνης, που απέχει περίπου 20χλμ από το επίκεντρο καταγράφηκε μέγιστη εδαφική επιτάχυνση 0,21g, περίοδος μέγιστης επιτάχυνσης 0,2sec και διάρκεια ισχυρής δόνησης 7 sec. Στην εγγύτερη περιοχή της σήραγγας δε διέρχονται γνωστά σεισμογόνα ρήγματα.

Σύμφωνα με τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (Ε.Α.Κ –2000) και την τελευταία τροποποίηση των διατάξεών του, η περιοχή του έργου ανήκει στην Ζώνη Σεισμικής Επικινδυνότητας Ι, στην οποία αντιστοιχεί Εδαφική Επιτάχυνση (ανηγμένη στην επιτάχυνση της βαρύτητας) $a = 0,16$ (Εγνατία Οδός Α.Ε., 2011).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία οι σεισμικές συνθήκες που λαμβάνονται υπόψη αφορούν τη δεύτερη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας που συναντάται στον ελληνικό χώρο. Έτσι επιλέγεται τιμή εδαφικής επιτάχυνσης ίση με 0.24g (ποσοστό της επιτάχυνσης της βαρύτητας g).

4.6 Γεωτεχνικές Παράμετροι Σχεδιασμού

Με βάση την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της γεωλογικής και γεωτεχνικής έρευνας υπαίθρου και εργαστηρίου πραγματοποιήθηκαν γεωμηχανικές ταξινομήσεις βραχόμαζας για την υπόγεια όρυξη κατά GSI.

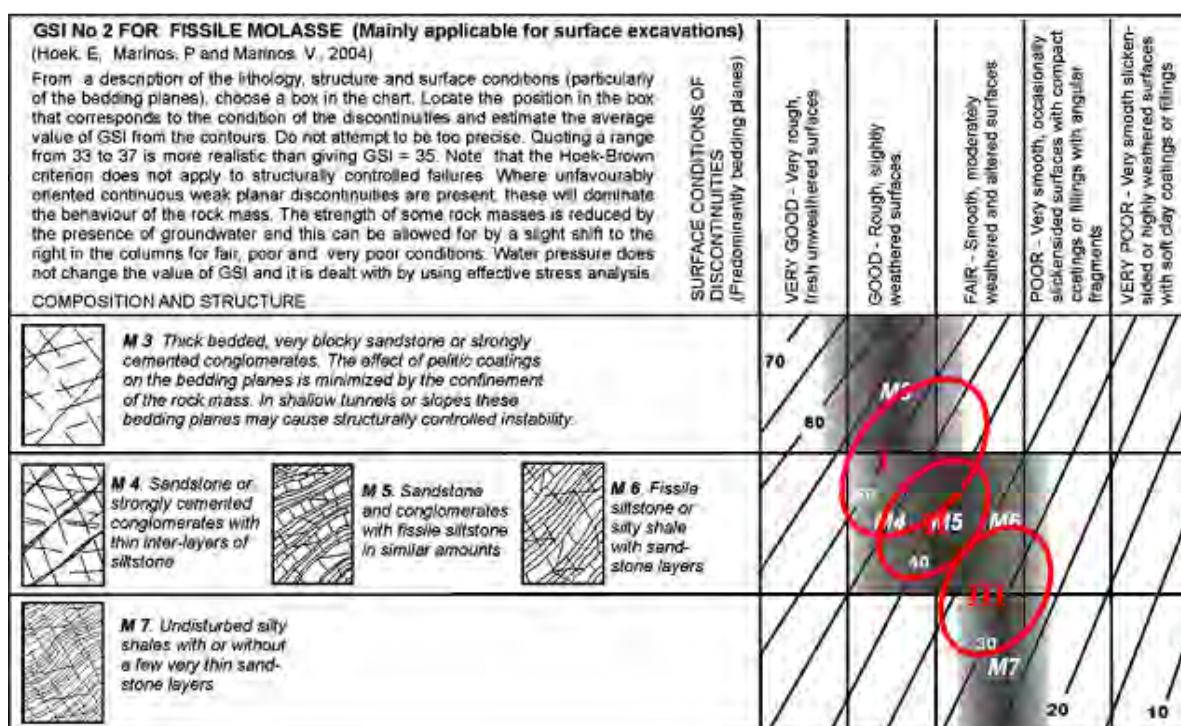
Με βάση τα αποτελέσματα του συνόλου των γεωτεχνικών ερευνών που εκτελέστηκαν στην περιοχή του έργου, της γεωλογίας και τεκτονικής της περιοχής και της μακροσκοπικής συμπεριφοράς των σχηματισμών, εκτιμάται ότι οι σχηματισμοί διαμέσου των οποίων θα διανοιχθεί η σήραγγα μπορούν να περιγραφούν (από πλευράς μηχανικών ιδιοτήτων) μέσω τριών κατηγοριών

βραχώμαζας (κατηγορίες I, II και III) που καλύπτουν το πλήρες φάσμα των αναμενόμενων γεωτεχνικών συνθηκών στην περιοχή των έργων.

Πίνακας 4.1. Κατηγορίες βραχώμαζας (Εγνατία Οδός Α.Ε., 2011)

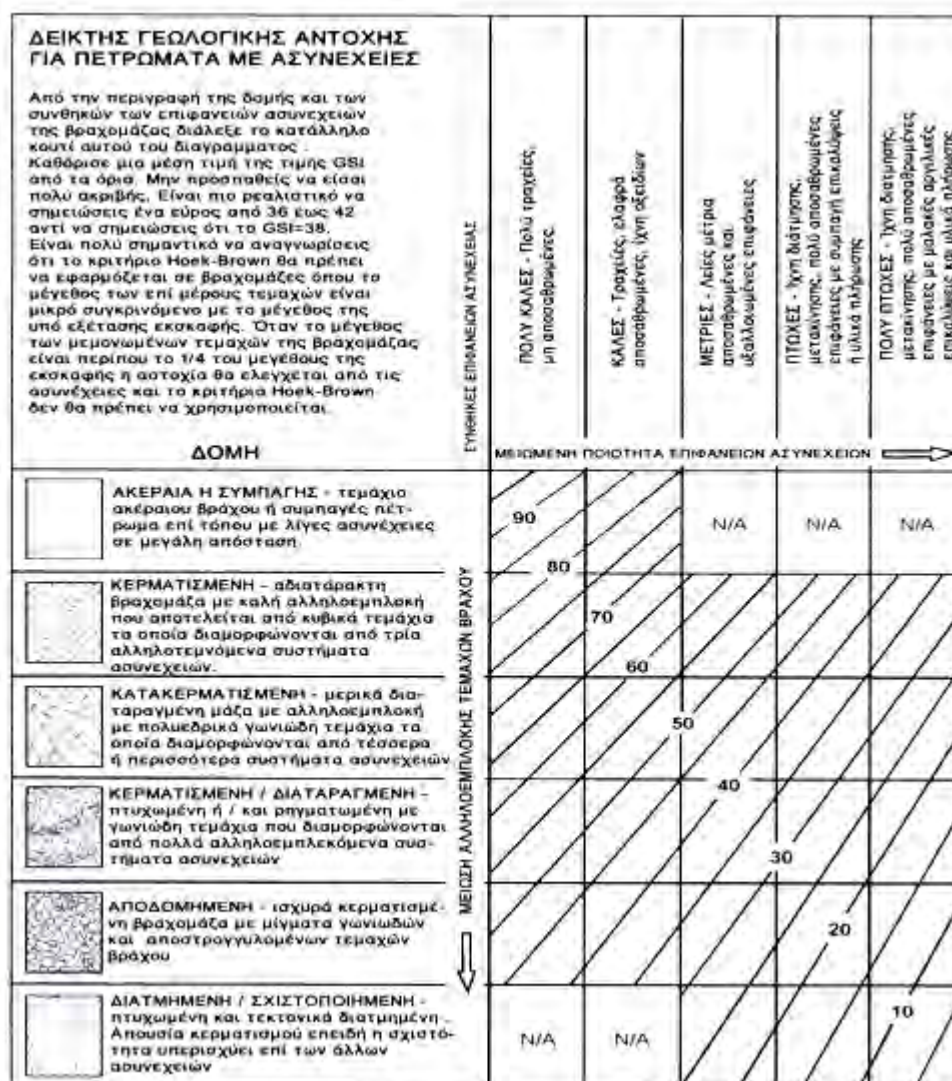
ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑ Σ	ΛΙΘΟΛΟΓΙΑ	ΕΥΡΟΣ GSI
I	καλά συγκολλημένα κροκαλοπαγή και ψαμμίτες καλής διαγένεσης Ασβεστολιθικό κροκαλοπαγές	>45
II	Εναλλαγές ψαμμιτών, κροκαλοπαγών και ιλυολίθων	35-45
III	κακής διαγένεσης ψαμμίτες και ιλυόλιθοι Τεκτονικό λατυποπαγές	25-35

Για τους μολασσικούς σχηματισμούς χρησιμοποιείται το διάγραμμα του δείκτη GSI, όπως αυτό παρατίθεται παρακάτω.



Σχήμα 4.2. Διάγραμμα δείκτη GSI για μολασσικούς σχηματισμούς (Εγνατία οδός Α.Ε., 2011)

Για το σχηματισμό του ασβεστολιθικού κροκαλοπαγούς και του τεκτονικού λατυποπαγούς χρησιμοποιείται το κλασσικό διάγραμμα του δείκτη GSI, όπως αυτό παρατίθεται παρακάτω.



Σχήμα 4.3. Διάγραμμα δείκτη GSI (Εγνατία οδός Α.Ε., 2011)

Στον ακόλουθο πίνακα συνοψίζονται οι τιμές των γεωτεχνικών παραμέτρων που προέκυψαν για τις διάφορες κατηγορίες βραχομάζας και εφαρμόζονται για την μελέτη διάνοιξης και προσωρινής υποστήριξης της σήραγγας στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Πίνακας 4.2. Στοιχεία κατηγοριοποίησης και αντιπροσωπευτικό εύρος τιμών γεωτεχνικών παραμέτρων βραχώμαζας που αναμένεται να συναντηθούν κατά μήκος της σήραγγας Ιεροπηγής.

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ	I	II	III
GSI	>45	35-45	25-35
c (kPa)	202-254	135-164	73-92
ϕ (°)	51-54	44-47	31-35
$\nu^{(*)}$	0,30	0,30	0,30
$\sigma_{c, mass}$ (MPa)	0,7-1,2	0,24-0,45	0,06-0,12
E_{mass} (GPa)	1,0-1,8	0,34-0,67	0,12-0,21
Παραμόρφωση (%)	0,04	0,09	0,55

Στην παρούσα εργασία γίνεται ανάλυση της ευστάθειας μονής και δίδυμης σήραγγας για τιμές γεωτεχνικών παραμέτρων βραχώμαζας των κατηγοριών I και II, υπό την επίδραση διαφορετικών συνθηκών στρωματογραφίας.

4.7 Ανάλυση αρχικού εντατικού πεδίου

Σε αντίθεση με τις επίγειες δομικές κατασκευές οι οποίες (εκτός από το ίδιο βάρος τους) θα δεχτούν φορτία μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής τους, η κατασκευή ενός υπόγειου έργου αποτελεί μια δραστική επέμβαση σε ένα υλικό το οποίο βρίσκεται ήδη υπό την επίδραση ενός πλήρως ανεπτυγμένου τασικού πεδίου. Το αρχικό –πριν από την κατασκευή του έργου– αυτό πεδίο, ο προσανατολισμός του (οι διευθύνσεις των κύριων τάσεων δηλαδή) και η έντασή του είναι τα μεγέθη τα οποία μαζί με τη γεωμετρία του έργου, τη φύση και τις παραμέτρους αντοχής και παραμορφωσιμότητας του υλικού θα καθορίσουν τα προβλήματα τα οποία θα εμφανιστούν και πρέπει να αντιμετωπιστούν κατά την κατασκευή (Μαραγκός 2001).

Η μέγιστη κύρια τάση είναι η κατακόρυφη γεωστατική τάση σ_v που δέχεται ένα στοιχειώδες δείγμα πετρώματος σε βάθος z από την επιφάνεια του εδάφους (βάρος της κατακόρυφης στήλης των υπερκείμενων πετρωμάτων) και υπολογίζεται από τη σχέση (1) (Hoek, E., and Brown, E.T., 1994):

$$\sigma_v = \gamma \cdot z \quad (1)$$

όπου: σ_v = κατακόρυφη κύρια τάση (MPa)

z = το βάθος από την επιφάνεια του εδάφους (m)

γ = το ειδικό βάρος της υπερκείμενης βραχόμαζας (MN/m³)

Οι οριζόντιες γεωστατικές τάσεις, που ενεργούν στο ίδιο στοιχειώδες δείγμα πετρώματος σε ένα βάθος z από την επιφάνεια του εδάφους, εκτιμώνται συνήθως έμμεσα με τον λόγο των οριζόντιων (σ_h) προς των κατακόρυφων τάσεων (σ_v). Ο λόγος αυτός συμβολίζεται με k και ονομάζεται συντελεστής πλευρικών ωθήσεων (ή συντελεστής γεωστατικών τάσεων). Δηλαδή :

$$k = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} \quad (2)$$

Οι Terzaghi και Richard (1952) θεώρησαν ότι σε μια βαρυτικά φορτισμένη, βραχόμαζα χωρίς πλευρική παραμόρφωση, η τιμή του k είναι ανεξάρτητη του βάθους και δίνεται από τη σχέση:

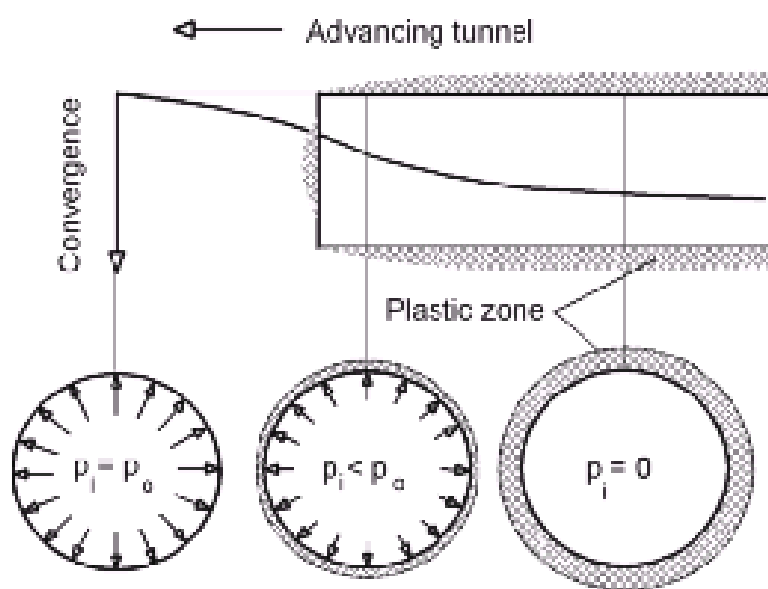
$$k = \frac{\nu}{1-\nu} \quad (3)$$

όπου ν είναι ο λόγος του Poisson της βραχόμαζας. Αυτή η σχέση χρησιμοποιήθηκε ευρέως στα πρώτα στάδια της μελέτης της μηχανικής των πετρωμάτων (θεωρητικά για $0 < \nu < 0.5$ δίνει $0 < k < 1$).

5. Μεθοδολογία Σχεδιασμού Προσωρινής Υποστήριξης

5.1 Γενικές αρχές σχεδιασμού

Ο βέλτιστος σχεδιασμός ενός συστήματος προσωρινής υποστήριξης εξαρτάται όχι μόνο από τα προτεινόμενα μέτρα υποστήριξης αλλά και από το χρόνο εφαρμογής τους. Ένας σημαντικός παράγοντας στον σχεδιασμό της υποστήριξης είναι η μείωση του φορτίου της σήραγγας (χαλάρωση) που λαμβάνει χώρα πριν την υποστήριξη κατά την προχώρηση αυτής, η οποία συνοδεύεται από ανάλογες παραμορφώσεις της βραχομάζας και η οποία εξαρτάται από την απόσταση πίσω από το μέτωπο στην οποία τοποθετείται η υποστήριξη (Καββαδάς, 2005).



Σχήμα 5.1. Βαθμιαία εκτόνωση των γεωστατικών τάσεων ως συνάρτηση της απόστασης από το μέτωπο (Καββαδάς, Μ., 2005)

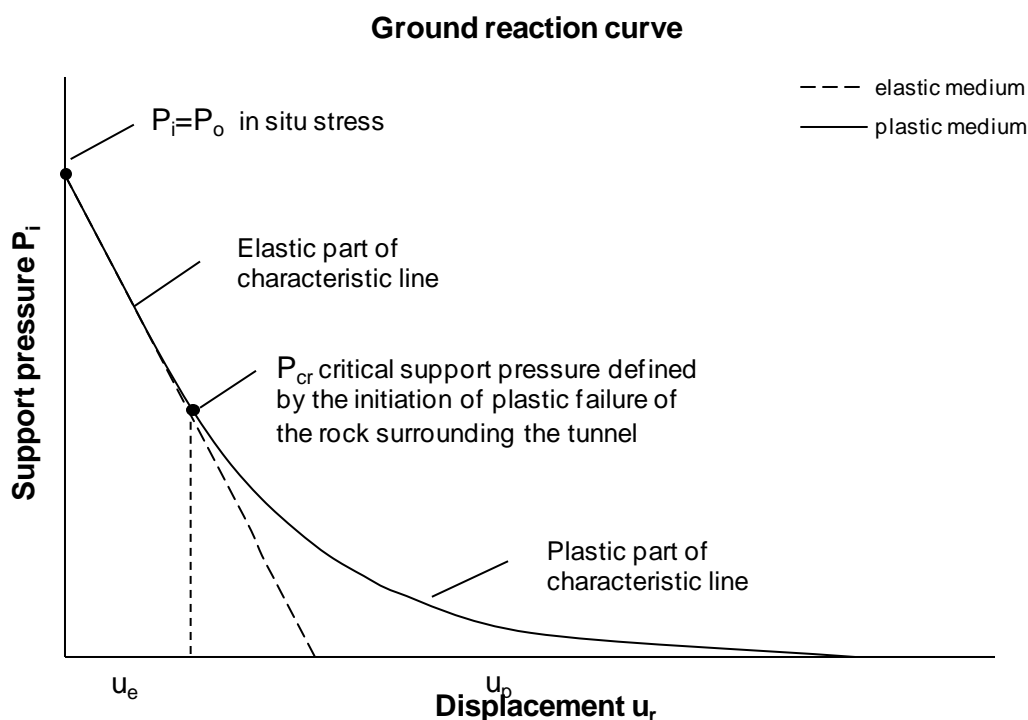
Επιτρέποντας έτσι κάποιο ελεγχόμενο ποσοστό παραμορφώσεων, το σύστημα υποστήριξης θα παραλάβει πιέσεις σημαντικά χαμηλότερες εκείνων που αναπτύσσονται αμέσως μετά την εκσκαφή. Από την άλλη πλευρά η ανοχή μεγάλων παραμορφώσεων επιφέρει μείωση των μηχανικών αντιδράσεων της βραχομάζας και είναι πιθανόν να δημιουργήσει μακροχρόνια δυσμενείς συνθήκες φορτίσεων. Επομένως, ο κύριος στόχος του συστήματος αρχικής υποστήριξης θα πρέπει να είναι η ενεργοποίηση και διατήρηση της εγγενούς μηχανικής αντοχής της

περιβάλλουσας βραχώμαζας, ώστε να αξιοποιηθεί κατά το μέγιστο δυνατό το δυναμικό αυτοστηρίξεως της. Αυτό επιτυγχάνεται με χρονικά κατάλληλη τοποθέτηση ενός συστήματος υποστύλωσης κατάλληλης δυσκαμψίας και επαρκούς φέρουσας ικανότητας (Καββαδάς, 2005).

Η εκτόνωση των γεωστατικών φορτίων μπορεί να εκφραστεί με την βαθμιαία μείωση του αρχικού εντατικού πεδίου κατά μήκος της περιμέτρου της σήραγγας (επιφανειακές τάσεις),

$$P_i = (1 - \lambda)P_o \quad (4)$$

όπου P_o είναι το αρχικό εντατικό πεδίο σε σημείο της περιφέρειας της σήραγγας και λ ο συντελεστής χαλάρωσης. Από την άλλη πλευρά, η σύγκλιση της σήραγγας μπορεί να σχετισθεί με τις επιφανειακές τάσεις που δρουν στην περιφέρεια της σήραγγας με τη βοήθεια της Καμπύλης Αντίδρασης Πετρώματος (GRC) (Καββαδάς, 2005).



Σχήμα 5.2. Καμπύλη Αντίδρασης Πετρώματος (Καββαδάς, Μ., 2005)

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα στην αρχή η παραμόρφωση της βραχομάζας είναι ελαστική και ο ρυθμός μείωσης της αρχικής τάσης μεγάλος. Όταν η τάση P_i φθάσει μία κρίσιμη τιμή P_{cr} συμβαίνει μετάβαση από την ελαστική στην πλαστική περιοχή με μείωση του ρυθμού εκτόνωσης και ταυτόχρονη αύξηση του ρυθμού παραμόρφωσης (Καββαδάς, 2005).

5.2 Μέτρα προσωρινής υποστήριξης και στάδια κατασκευής

Η εγκεκριμένη μελέτη, για την πλήρη και τεκμηριωμένη διαστασιολόγηση του συστήματος προσωρινής υποστήριξης της υπόγειας εκσκαφής της σήραγγας πρόσβασης και για τον έλεγχο των καθιζήσεων, περιλάμβανε ελαστοπλαστικές αναλύσεις με εφαρμογή του προγράμματος FLAC 7.0. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα τα διαστασιολογημένα μέτρα προσωρινής υποστήριξης έτσι ώστε με την χρήση των προγραμμάτων FLAC 7.0 και Phase² να μελετηθεί η καταπόνησή τους, καθώς και οι μετατοπίσεις του εδάφους, μεταβάλλοντας διάφορες παραμέτρους.

Η επάρκεια και η διαστασιολόγηση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης γίνεται με βάση τα παρακάτω κριτήρια:

- Η έγκαιρη σταθεροποίηση της διατομής της εκσκαφής.
- Ο έλεγχος των παραμορφώσεων της βραχομάζας στην περιοχή της εκσκαφής.
- Η καταπόνηση των στοιχείων υποστήριξης δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τα όρια της φέρουσας ικανότητά τους.
- Η ζώνη πλαστικών παραμορφώσεων θα πρέπει να είναι περιορισμένη.

Τα είδη των μέτρων υποστύλωσης που προτείνεται να χρησιμοποιηθούν είναι:

- Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα B25 (αναλόγου του σκυροδέματος C20/25).
- Δομικό πλέγμα.
- Ηλώσεις Βράχου (Φ25)
- Μεταλλικά πλαίσια (στη διατομή Β)

Τα μέτρα υποστύλωσης και ο ακριβής χρονισμός των φάσεων κατασκευής για κάθε κατηγορία δίνονται αναλυτικά παρακάτω (Εγνατία Οδός Α.Ε., 2011).

Πίνακας 5.1. Φάσεις κατασκευής για κατηγορία τυπικής διατομής Α

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ Α	
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ	Καλά συγκολλημένα κροκαλοπαγή και ψαμμίτες καλής διαγένεσης κερματισμένη έως κατακερματισμένη βραχώμαζα, με καλές επιφάνειες στρώσης. Ασβεστολιθικό κροκαλοπαγές
ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ	GSI> 45
ΜΕΤΡΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ	<p><u>Μέτρα υποστήριξης Α' Φάσης</u></p> <p>Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στατικού πάχους 15cm με ενδιάμεση τοποθέτηση δομικού πλέγματος T131</p> <p>Ηλώσεις βράχου Φ25, φέρουσας ικανότητας 200kN, μήκους 4.0m σε κάναβο 2.00m x 2.00m εφαρμοζόμενες στο θόλο.</p> <p><u>Μέτρα υποστήριξης Β' Φάσης</u></p> <p>Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στατικού πάχους 15cm με ενδιάμεση τοποθέτηση δομικού πλέγματος T131</p> <p>Ηλώσεις βράχου Φ25, φέρουσας ικανότητας 200kN, μήκους 4.0m σε κάναβο 2.00m x 2.00m εφαρμοζόμενες στο θόλο.</p> <p><u>Μέτρα αντιστήριξης μετώπου</u></p> <p>Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 5cm, στην επιφάνεια του μετώπου της άνω ημδιατομής όπου απαιτείται</p>
ΒΗΜΑ ΠΡΟΧΩΡΗΣΗΣ	Βήμα προχώρησης Α Φάσης 2.0m και Β Φάσης 4.0m.
ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ	Εκσκαφή σε δύο φάσεις (άνω και κάτω τμήμα της διατομής) με διατρήματα και ανατινάξεις.

Πίνακας 5.2. Σειρά φάσεων κατασκευής σε σχέση με το βήμα προχώρησης για κατηγορία Α (Εγνατία οδός Α.Ε., 2011)

Α		
.	ΑΝΩ ΗΜΙΔΙΑΤΟΜΗ	ΒΗΜΑ ΠΡΟΧΩΡΗΣΗΣ = 2.0m
1.	Εκσκαφή άνω ημιδιατομής	X
2.	Μηχανική απόσπαση επισφαλών όγκων	X
3.	1 ^η στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 5cm στην περίμετρο (και στο μέτωπο όπου απαιτείται)	X
4.	Τοποθέτηση δομικού πλέγματος T131	X-1
5.	Τοποθέτηση των ηλώσεων	X-1
6.	2 ^η στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 5εκ. στην περίμετρο	X-1
7.	3 ^η στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 5εκ. στην περίμετρο	X-2
Β		
.	ΚΑΤΩ ΗΜΙΔΙΑΤΟΜΗ	ΒΗΜΑ ΠΡΟΧΩΡΗΣΗΣ = 4.0m
1.	Εκσκαφή κάτω ημιδιατομής	Y
2.	Μηχανική απόσπαση επισφαλών όγκων	Y
3.	1 ^η στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 5cm στην περίμετρο	Y
4.	Τοποθέτηση δομικού πλέγματος T131	Y-1
5.	Τοποθέτηση των ηλώσεων	Y-1
6.	2 ^η στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 5cm στην περίμετρο	Y-1
7.	3 ^η στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 5εκ. στην περίμετρο	Y-2

Τα βήματα X & Y είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους.

Πίνακας 5.3. Φάσεις κατασκευής για κατηγορία τυπικής διατομής B

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ Β	
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ	Εναλλαγές ψαμμιτών, κροκαλοπαγών και ιλυολίθων, με μέτριες έως καλές επιφάνειες στρώσης.
ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ	GSI= 35-45
ΕΤΡΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ	<p><u>Μέτρα υποστήριξης Α΄ Φάσης</u></p> <p>Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στατικού πάχους 20cm με ενδιάμεση τοποθέτηση δομικού πλέγματος T131</p> <p>Ηλώσεις βράχου Φ25, φέρουσας ικανότητας 200kN, μήκους 5.0m σε κάναβο 2.00m x 1.50m</p> <p>Μεταλλικά πλαίσια HEB 120 ανά 1.50m.</p> <p><u>Μέτρα υποστήριξης Β΄ Φάσης</u></p> <p>Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στατικού πάχους 20cm με ενδιάμεση τοποθέτηση δομικού πλέγματος T131</p> <p>Ηλώσεις βράχου Φ25, φέρουσας ικανότητας 200kN, μήκους 5.0m σε κάναβο 2.00m x 1.50m</p> <p>Μεταλλικά πλαίσια HEB 120 ανά 1.50m.</p> <p><u>Μέτρα αντιστήριξης μετώπου</u></p> <p>Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 5cm, στην επιφάνεια του μετώπου της άνω ημιδιατομής όπου απαιτείται</p>
ΒΗΜΑ ΠΡΟΧΩΡΗΣΗΣ	Βήμα προχώρησης Α Φάσης 1.5m και Β Φάσης 3.0m.
ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ	Εκσκαφή σε δύο φάσεις (άνω και κάτω τμήμα της διατομής) με μηχανικά μέσα και διατρήματα και ανατινάξεις.

Πίνακας 5.4. Σειρά φάσεων κατασκευής σε σχέση με το βήμα προχώρησης (Εγνατία οδός Α.Ε., 2011)

A

. ΑΝΩ ΗΜΙΔΙΑΤΟΜΗ ΒΗΜΑ ΠΡΟΧΩΡΗΣΗΣ = 1.5m

1.	Εκσκαφή άνω ημιδιατομής	X
2.	Μηχανική απόσπαση επισφαλών όγκων	X
3.	1 ^η στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 5cm στην περίμετρο (και στο μέτωπο εκσκαφής όπου απαιτείται)	X
4.	Τοποθέτηση δομικού πλέγματος T131	X
5.	Τοποθέτηση μεταλλικών πλαισίων HEB 120	X
6.	Τοποθέτηση των ηλώσεων	X
7.	2 ^η στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 10cm στην περίμετρο	X- 1
8.	3 ^η στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 5cm στην περίμετρο	X- 2

B

. ΚΑΤΩ ΗΜΙΔΙΑΤΟΜΗ ΒΗΜΑ ΠΡΟΧΩΡΗΣΗΣ = 3.0m

1.	Εκσκαφή κάτω ημιδιατομής	Y
2.	Μηχανική απόσπαση επισφαλών όγκων	Y
3.	1 ^η στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 5cm στην περίμετρο	Y
4.	Τοποθέτηση δομικού πλέγματος T131	Y
5.	Τοποθέτηση μεταλλικών πλαισίων HEB 120	Y
6.	Τοποθέτηση των ηλώσεων	Y-1
7.	2 ^η στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 10cm στην περίμετρο	Y-1
8.	3 ^η στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 5cm στην περίμετρο	Y-2

Τα βήματα X & Y είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους.

5.2.1 Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα

Είναι ένας συγκεκριμένος τύπος σκυροδέματος που εφαρμόζεται με "ψεκασμό", αποτελείται από μείγμα τσιμέντου και άμμου ή άλλα αδρανή υλικά και διάφορων προσθέτων και με πεπιεσμένο αέρα το υλικό αυτό ωθείται μέσω ενός σωλήνα. Στο ακροφύσιο προστίθεται μια ελάχιστη δόση νερού ώστε να ενυδατωθεί το υλικό και έτσι ώστε να προωθείται πιο εύκολα.

Η ευρύτετη χρήση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος οφείλεται κυρίως στα παρακάτω τέσσερα χαρακτηριστικά του:

1. Έχει υψηλή θλιπτική αντοχή.
2. Η μεγάλη ταχύτητα εκτόξευσης παρέχει δυνατότητα πολύ καλής πρόσφυσης με το υλικό βάσης.
3. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αυτοστηρίζεται
4. Η εγκατάσταση του είναι κινητή.

Δεδομένου ότι το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, στην παρούσα διπλωματική, αφενός μεν τοποθετείται σε στρώσεις, αφετέρου δε, αναλαμβάνει φορτία σε μικρό χρονικό διάστημα μετά την τοποθέτησή του και πριν αναπτύξει την μέγιστη δυσκαμψία, για την προσομοίωση των φάσεων εκσκαφής και υποστύλωσης, ελήφθησαν πρόσθετα ενδιάμεσα στάδια προσομοίωσης των μέτρων υποστύλωσης, κατά τα οποία λαμβάνονται απομειωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, καθώς και διαφορετικά πάχη φορέα προσωρινής υποστύλωσης. . Τα χαρακτηριστικά της προσωρινής υποστύλωσης, που ελήφθησαν υπόψη για κάθε ενδιάμεσο στάδιο υποστύλωσης δίνονται αναλυτικά στην περιγραφή των διαφόρων σταδίων προσομοίωσης της εκσκαφής και υποστύλωσης.

Οι τιμές του μέτρου Ελαστικότητας που ελήφθησαν υπόψη στα διάφορα στάδια προσομοίωσης είναι (Εγνατία οδός Α.Ε., 2011):

Esh (νωπό)= 5000 MPa

Esh (8 ώρες)= 10000 MPa

Esh (24 ώρες)= 15000 MPa

Esh (28 μέρες)= 25000 MPa

5.2.2 Αγκύρια Βράχου

Τα αγκύρια που χρησιμοποιήθηκαν είναι ολόσωμης πάκτωσης και παρουσιάζονται στο σχήμα 10. Με τον όρο αγκύρια ολόσωμης πάκτωσης αναφερόμαστε σε χαλύβδινες ράβδους με νευρώσεις οι οποίες εισέρχονται εντός οπής σε εδάφη και βράχους. Ενεματώνονται πλήρως ή μερικώς και στο ελεύθερο άκρο στερεώνονται με ειδικό περικόχλιο και τη μεσολάβηση πλάκας διανομής. Δεν εφαρμόζεται φορτίο προέντασης ή μετέντασης, αλλά παραλαμβάνουν τα φορτία που δημιουργεί η εδαφική παραμόρφωση μέσω τριβής. Η λειτουργία τους οφείλεται σε αυτήν ακριβώς τη δυνατότητα των ράβδων να αναλαμβάνουν εφελκυστικά φορτία στο ελεύθερο άκρο και στην ενίσχυση / συρραφή του εδάφους ή βράχου με την εισαγωγή τάσεων εκ δυνάμεως τριβής (ekkaif, 2016).

Οι παράμετροι σχεδιασμού που ελήφθησαν για τα αγκύρια είναι:

- Υλικό: χάλυβας S500,
- Διάμετρος: 25 mm,
- Μήκος αγκύρωσης:
 - 4m σε κάναβο 2.00m x 2.00m εφαρμοζόμενα στο θόλο για τη διατομή Α,
 - 5m σε κάναβο 2.00m x 1.50 m εφαρμοζόμενα στο θόλο για τη διατομή Β,

5.2.3 Μεταλλικά Πλαίσια

Τα μεταλλικά πλαίσια τοποθετούνται σε κάθε βήμα εκσκαφής, κατά μήκος του άξονα της σήραγγας και συνδέονται μεταξύ τους με ράβδους Φ20 από χάλυβα S500s, σε διάφορες στάθμες καθ' ύψος, έτσι ώστε να διατηρείται το τοποθετούμενο πλαίσιο στην ορθή θέση κατά τις εργασίες εκτόξευσης σκυροδέματος. Αυτές οι διαδοκίδες θα αντιδρούν επίσης ως διαμήκεις δοκοί για να παραλαμβάνουν δυνάμεις στο κέλυφος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος κατά τη διαμήκη έννοια. (Σοφιανός, 2012).

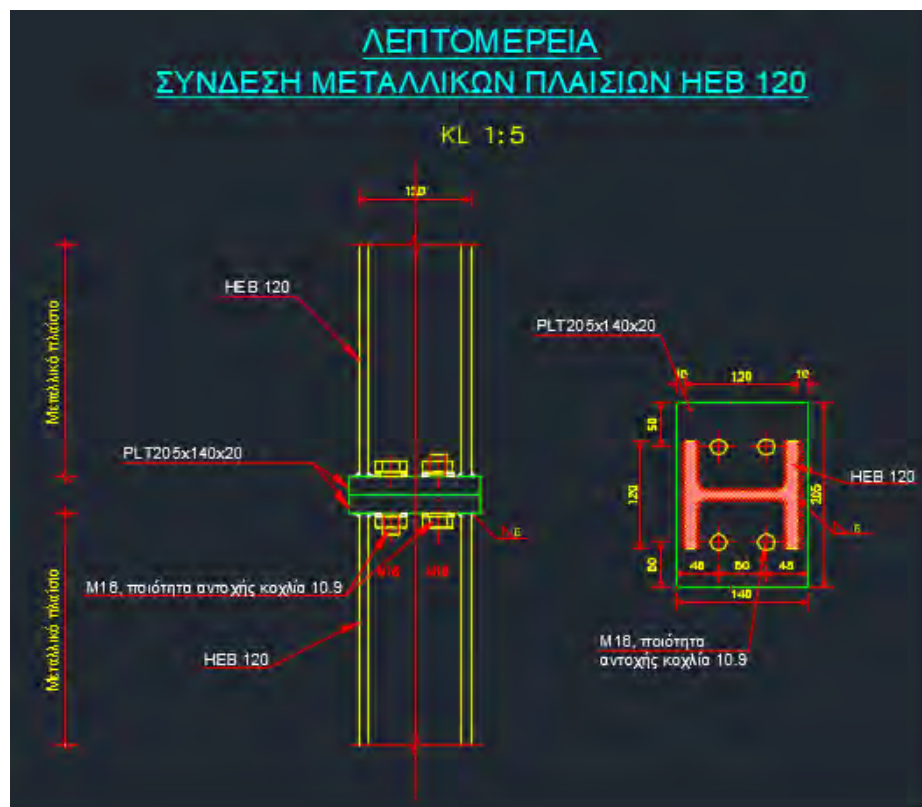
Η διατομή των σιδηροδοκών είναι HEB 120 για την διατομή Β από χάλυβα St37. Στο εργοτάξιο προσκομίζονται σε τεμάχια καμπυλωμένα τα οποία συνδέονται μεταξύ τους μέσω μετωπικών ελασμάτων ελαχίστου πάχους 20mm και κοχλιοφόρων ήλων M24. Σε κάθε περίπτωση πρέπει τα μεταλλικά πλαίσια να εγκιβωτίζονται πλήρως

εντός του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, το οποίο πρέπει να εφαρμόζεται με επιμελή διάστρωση και να αποφεύγονται ενδιάμεσα κενά και «κουφώματα» λόγω ατελούς διάστρωσης, τα οποία επιφέρουν ουσιαστικές δυσμενείς επιδράσεις τόσο στη δομική συμπεριφορά της σύμμικτης κατασκευής όσο και στη στατική επάρκεια του φορέα (Σοφιανός, 2012).

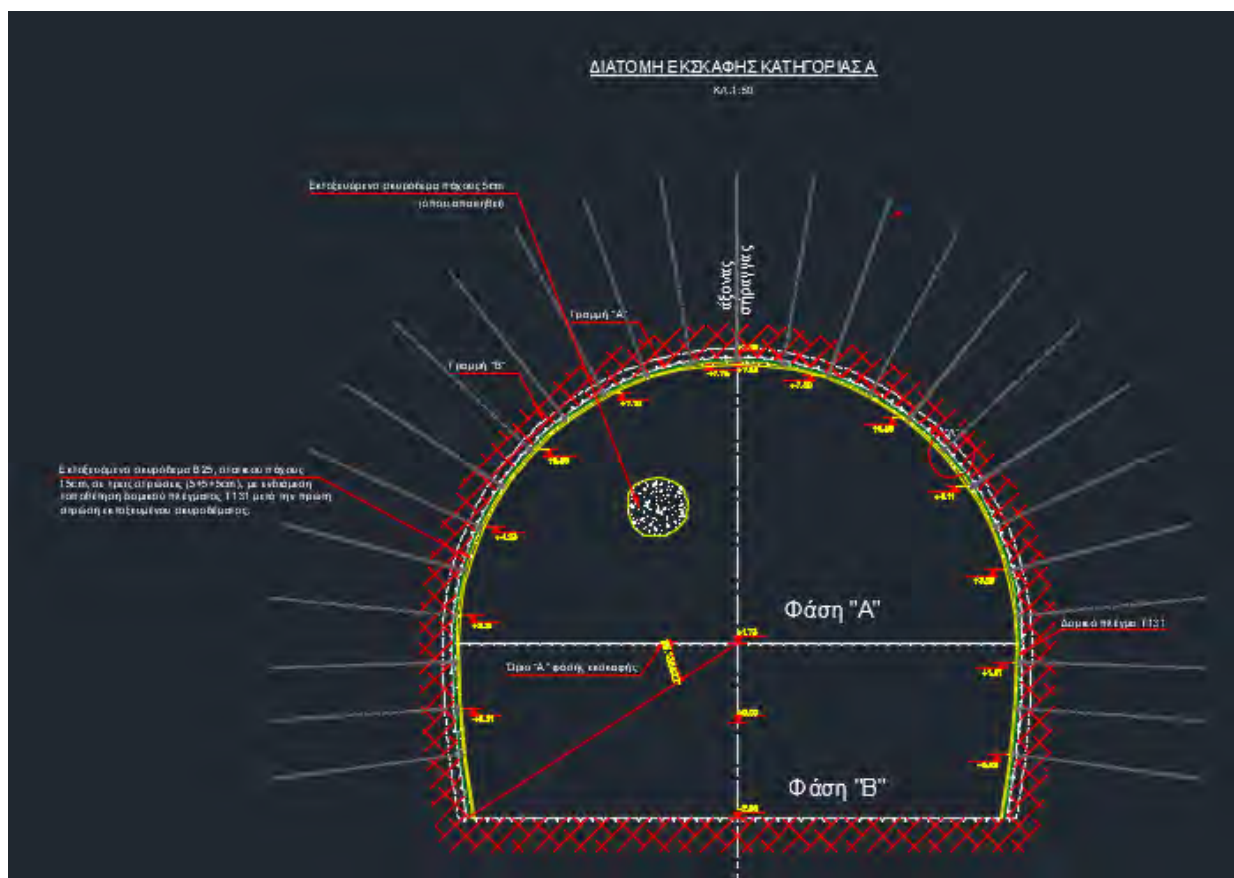
Πίνακας 5.5. Τεχνικά χαρακτηριστικά μεταλλικών πλαισίων

ΤΥΠΟΣ	ΜΕΓΕΘΟΣ	I (cm ⁴)	W (cm ³)	F (cm ²)
Μεταλλικά πλαίσια	HEB120	864	144	34

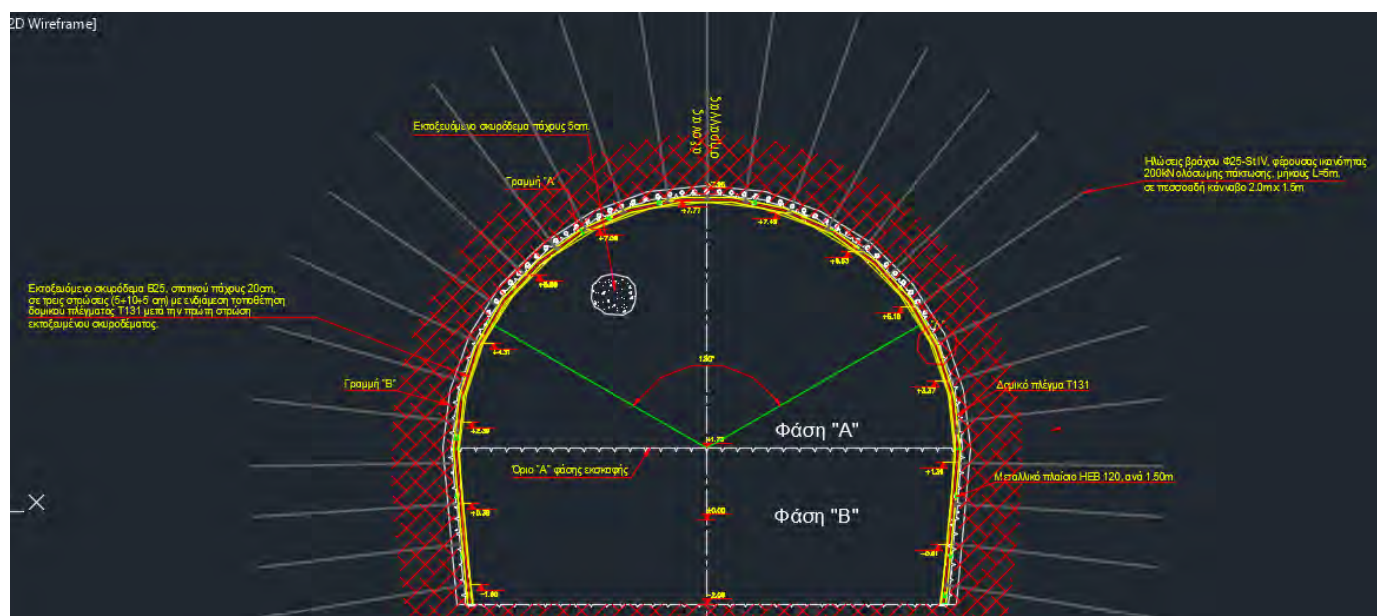
Τα μεταλλικά πλαίσια χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση εκσκαφής της σήραγγας στην κατηγορία Β ανά 1.50 m, ενώ δεν έγινε χρήση τους στην κατηγορία Α.



Σχήμα 5.3. Λεπτομέρεια σύνδεσης μεταλλικών πλαισίων (Εγνατία Οδός Α.Ε., 2011)



Σχήμα 5.4. Τυπική διατομή εκσκαφής κατηγορία Α (Εγνατία Οδός Α.Ε., 2011)



Σχήμα 5.5. Τυπική διατομή εκσκαφής κατηγορίας Β (Εγνατία Οδός Α.Ε., 2011)

6. Βασικά Στοιχεία και Παράμετροι Προσομοίωσης

6.1 Προσομοίωση διάνοιξης σήραγγας πρόσβασης με χρήση των προγραμμάτων Flac 7.0 και Phase² 8.0

6.1.1 Γενικά για το FLAC7.0

Το FLAC 7.0 είναι ένα δισδιάστατο πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών ιδανικό για αριθμητική προσομοίωση προβλημάτων γεωτεχνικής μηχανικής. Έχει την δυνατότητα να προσομοιώσει την μηχανική συμπεριφορά εδαφικών υλικών, πετρωμάτων ή άλλων υλικών. Τα υλικά προσομοιώνονται ως στοιχεία ή ζώνες που μορφώνουν ένα κάναβο ο οποίος μπορεί να τροποποιηθεί ανάλογα τις ανάγκες του προβλήματος (ITASCA Consulting Group, 2018).

Το FLAC 7.0 είναι κατάλληλο για :

- την επίλυση προβλημάτων επίπεδης παραμόρφωσης,
- ελαστοπλαστική συμπεριφορά υλικών,
- εκσκαφή σε φάσεις,
- προσομοίωση των μέτρων υποστήριξης και υπολογισμό της καταπόνησης τους,
- μεταβαλλόμενες τάσεις πεδίου,
- στατική ανάλυση,
- δυναμική ανάλυση (προσομοίωση σεισμού),
- παραμετρική ανάλυση λόγω πρόσβασης στον κώδικα του προγράμματος.

Το FLAC 7.0 δεν διαθέτει κώδικα διακριτών στοιχείων και επομένως δεν έχει την δυνατότητα να προσομοιώσει τις ασυνέχειες των πετρωμάτων.

6.1.2 Γενικά για το PHASE² 8.0

Το πρόγραμμα PHASE² 8.0 είναι ένας δισδιάστατος κώδικας πεπερασμένων στοιχείων για τον υπολογισμό των τάσεων και των μετατοπίσεων γύρω από υπόγειες ή επιφανειακές εκσκαφές. Το πρόγραμμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση σύνθετων πολυσταδιακών γεωτεχνικών προβλημάτων. Τα προβλήματα που μπορούν να επιλυθούν με το πρόγραμμα PHASE² 8.0 περιλαμβάνουν (Rocscience Inc. , 2018):

- Εκσκαφή σε στάδια,
- Ευστάθεια πρανών,
- Υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα,
- Συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης,
- Ελαστοπλαστική συμπεριφορά υλικών,
- Διαφορετικά είδη αγκυρίων: σημειακής αγκύρωσης, πλήρους πάκτωσης, αγκύρια συρματοσχοίνου, και swellex ή split-set,
- Διαφορετικά είδη χαλύβδινων πλαισίων
- Μεταβαλλόμενες τάσεις πεδίου,
- Στατική ανάλυση,
- Δυναμική ανάλυση (προσομοίωση σεισμού),
- Ασυνέχειες (μεμονωμένες και οικογένειες ασυνεχειών) και ρήγματα.

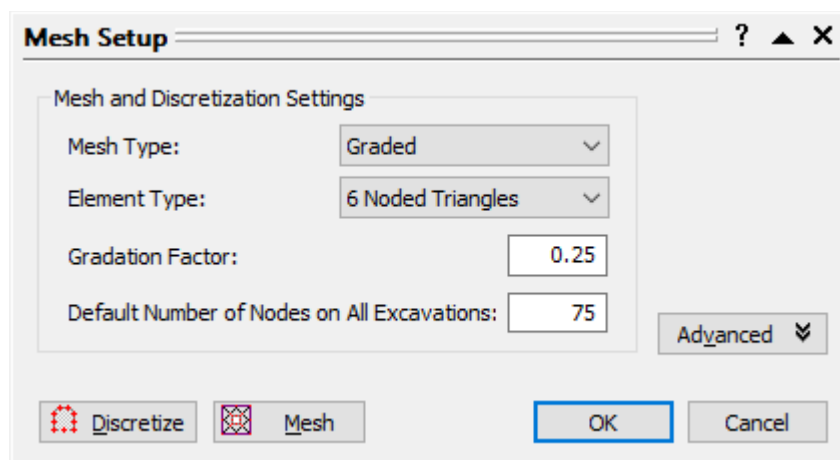
Το PHASE² 8.0 δίνει την επιλογή στο χρήστη να χρησιμοποιήσει τρικομβικά, τετρακομβικά, εξακομβικά ή οκτακομβικά στοιχεία στις αναλύσεις.

6.2 Κάνναβος

Στο πρόγραμμα FLAC 7.0 κατασκευάστηκε τετραγωνικός κάνναβος μεγέθους 170x170 στοιχείων με ισοδιάσταση 0,5mX0,5m (85m x 85m). Η πύκνωση του καννάβου είναι ομοιόμορφη και το πλήθος των στοιχείων δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Τα στοιχεία που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα είναι τετρακομβικά.

Αντίστοιχα στο Phase² 8.0 για τη δημιουργία καννάβου χρησιμοποιήθηκε σχεδιαστικό μοντέλο μορφής CAD που διαθέτει το πρόγραμμα. Είναι τετραγωνικός με διαστάσεις 85m x 85m και η διακριτοποίησή του έγινε αυτόματα από

ενσωματωμένο υποπρόγραμμα. Στην ανάλυση επιλέχθηκαν εξακομβικά στοιχεία με συντελεστή διαβάθμισης 0.25 για μεγαλύτερη ακρίβεια.



Σχήμα 6.1. Διακριτοποίηση καννάβου στο πρόγραμμα Phase2 8.0

6.3 Γεωμετρία της διατομής

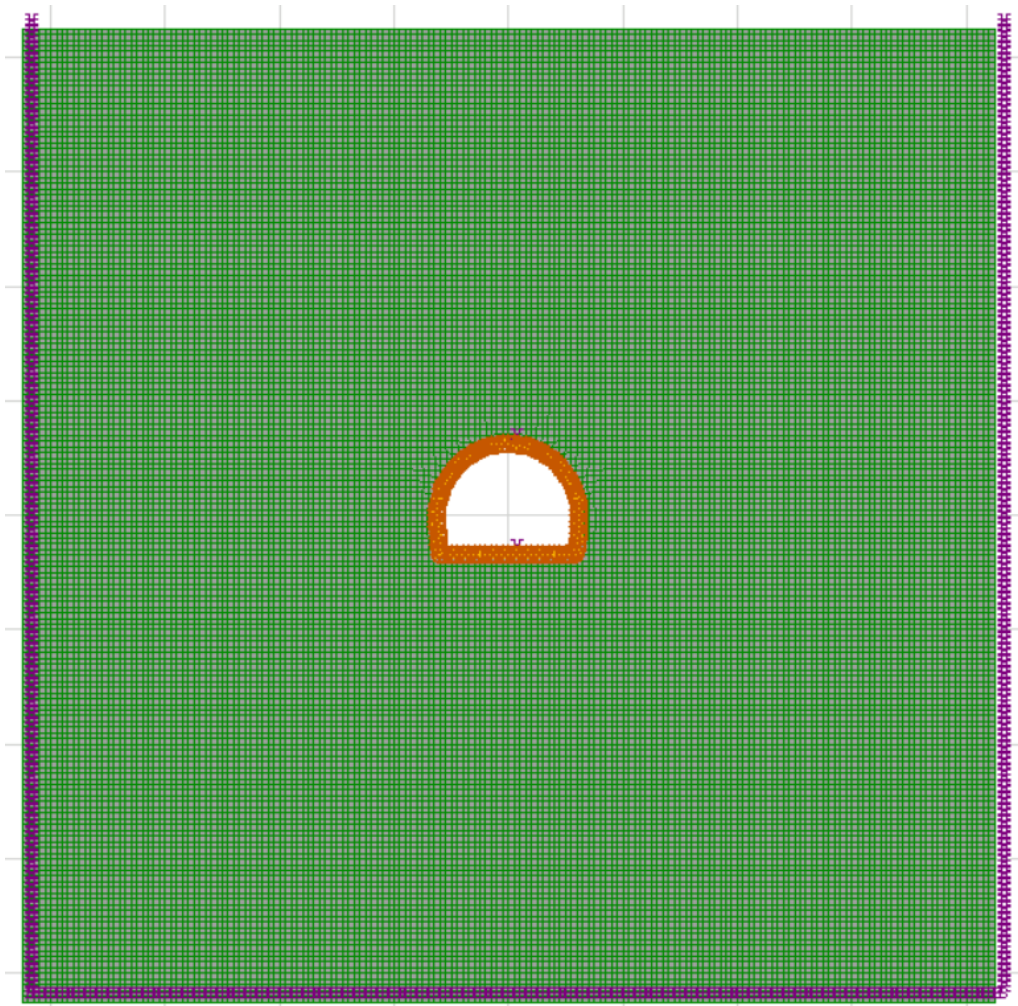
Η γεωμετρία των διατομών των σηράγγων έχει πεταλοειδή μορφή. Σύμφωνα με τα σχέδια τυπικών διατομών για τις κατηγορίες Α και Β, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά είναι τα εξής:

- Κατηγορία Α: Η ακτίνα της εκσκαφής είναι 6,15m και το ύψος 9,94m. Το ανώτερο σημείο της διατομής βρίσκεται σε απόσταση 36,35m από την επιφάνεια του εδάφους, ενώ το κατώτερο σε απόσταση 46,29m.
- Κατηγορία Β: Η ακτίνα της εκσκαφής είναι 6,2m και το ύψος 9,99m. Το ανώτερο σημείο της διατομής βρίσκεται σε απόσταση 36,3m από την επιφάνεια του εδάφους, ενώ το κατώτερο σε απόσταση 46,29m.

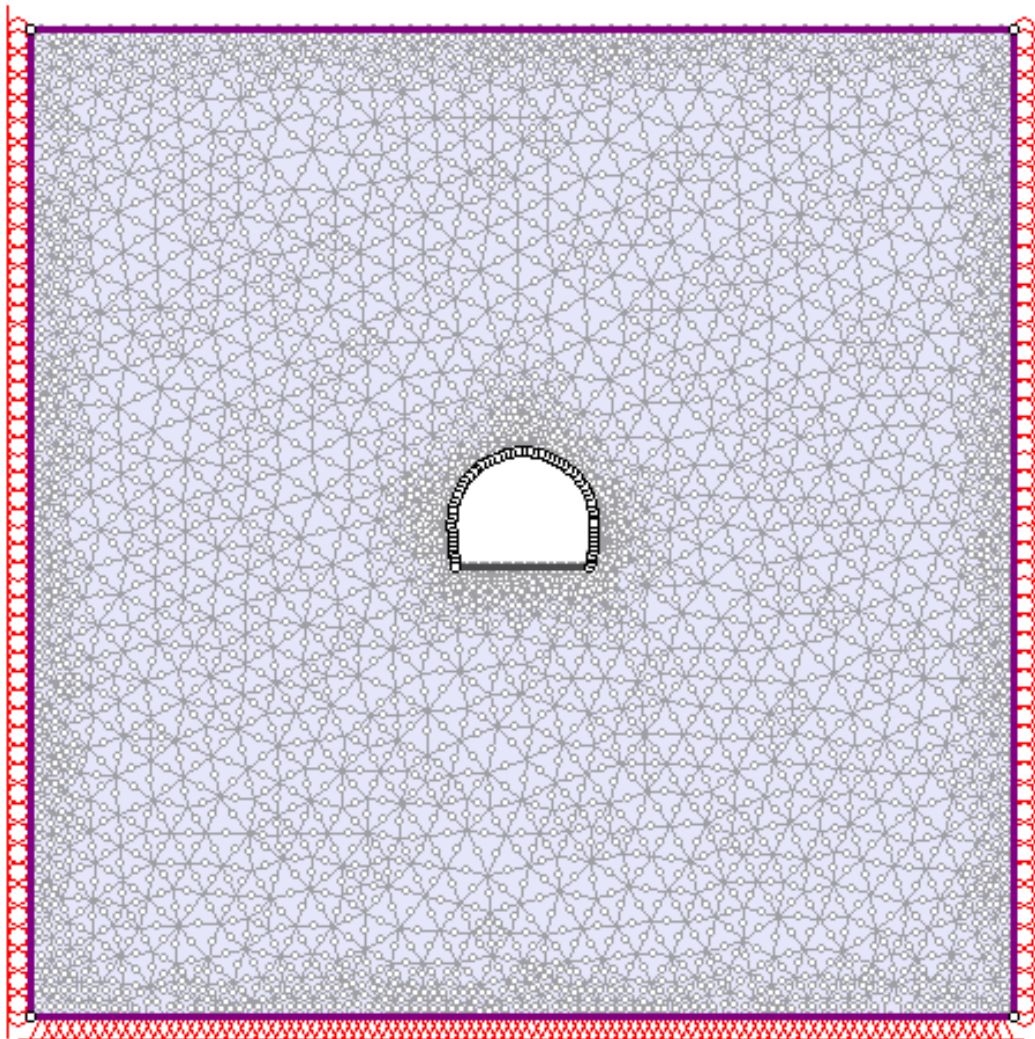
Τα μοντέλα εκτείνονται 36,35m από τα πλάγια όρια της εκσκαφής, απόσταση που μας εξασφαλίζει ότι επιλέγεται το μεγαλύτερο εύρος τιμών των μετατοπίσεων, των τάσεων και των παραμορφώσεων γύρω από το άνοιγμα.

6.4 Συνοριακές Συνθήκες

Χρησιμοποιούνται κυλήσεις κατακόρυφα στα όρια του καννάβου, ώστε να επιτρέπουν την κατακόρυφη μετακίνηση του προσομοιωμένου εδάφους. Οριζόντια, στο κάτω άκρο του καννάβου, χρησιμοποιούνται αρθρώσεις οι οποίες απαγορεύουν τις οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις.



Σχήμα 6.2. Τυπική γεωμετρία μοντέλου προσομοίωσης μονής σήραγγας (Flac 7.0)



Σχήμα 6.3. Τυπική γεωμετρία μοντέλου προσομοίωσης μονής σήραγγας (Phase² 8.0)

6.5 Ιδιότητες υλικών

Οι παράμετροι των εδαφικών σχηματισμών που λήφθηκαν για την προσομοίωση στο Flac 7.0 και στο Phase² 8.0 πάρθηκαν από τον πίνακα 5.2. Για τις γεωτεχνικές ενότητες χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Mohr-Coulomb το οποίο προσομοιώνει καταλλήλως την ελαστοπλαστική συμπεριφορά των εδαφικών σχηματισμών.

Οι ιδιότητες που εισήχθησαν στο πρόγραμμα Flac 7.0 είναι:

- Πυκνότητα (Mass–Density) [kg/m^3]
- Μέτρο Διάτμησης G (Pa)
- Μέτρο Ισότροπης Συμπίεσης K (Pa)

- Συνοχή (c) [Pa]
- Γωνία τριβής (Φ) [°]

Το μέτρο ισότροπης συμπίεσης K και το μέτρο διάτμησης G δίνονται από τους παρακάτω τύπους :

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (5)$$

$$G = \frac{E}{2(\nu+1)} \quad (6)$$

όπου ο λόγος Poisson $\nu=0,3$.

Ακολουθούν οι τιμές των παραπάνω παραμέτρων για τους εδαφικούς σχηματισμούς που εισήχθησαν στο Flac 7.0.

```
model mohr notnull group 'rockmass I'
prop density=2609.0 bulk=1.1667e9 shear=5.3846e8 fric=53 coh=2.28e5
model mohr notnull group 'rockmass II'
prop density=2038.0 bulk=2.8333333E8 shear=1.3076923E8 cohesion=135000 friction=44.0
model mohr notnull group 'rockmass II'
prop density=2038.0 bulk=4.208333e8 shear=1.942308e8 friction=45 cohesion=15e4
model mohr notnull group 'rockmass III'
prop density=2038.0 bulk=1.41666667E8 shear=6.5384615E7 cohesion=83000.0 friction=33.0
```

Σχήμα 6.4. Εισαγωγή εδαφικών παραμέτρων στο Flac 7.0

Το λογισμικό Phase² 8.0 δίνει τη δυνατότητα της χρήσης ιδιοτήτων των γεωυλικών από μία βάση δεδομένων που χρησιμοποιούνται σε κάθε μοντέλο μέσω της επιλογής properties. Στα σχήματα 7.5-7.8 παρουσιάζονται αναλυτικά οι ιδιότητες που επιλέχθηκαν για τις κατηγορίες βραχώμαζας I, II και III.

rockmass I

Name: Material Color:

Initial Element Loading: Unit Weight: (MN/m3):

Elastic Properties

Elastic Type: Poisson's Ratio:

Young's Modulus (MPa): ☐ Young's Modulus (resid) (MPa):

E1 (MPa): E2 (MPa): E3 (MPa):

ν_{12} : ν_{13} : ν_{23} :

Strength Parameters

Failure Criterion: ☐ ☐ Material Type:

Tensile Strength (peak) (MPa): Dilation Angle (deg):

Fric. Angle (peak) (deg): Fric. Angle (resid) (deg):

Cohesion (peak) (MPa): Cohesion (resid) (MPa):

Tensile Strength (resid) (MPa):

☐ Stage Properties ☐ Datum Dependent

Unsaturated Shear Strength

Phi b: Air Entry (MPa):

Σχήμα 6.5. Ιδιότητες κατηγορίας I

rockmass II

Name: Material Color:

Initial Element Loading: Unit Weight: (MN/m3):

Elastic Properties

Elastic Type: Poisson's Ratio:

Young's Modulus (MPa): ☐ Young's Modulus (resid) (MPa):

E1 (MPa): E2 (MPa): E3 (MPa):

ν_{12} : ν_{13} : ν_{23} :

Strength Parameters

Failure Criterion: ☐ ☐ Material Type:

Tensile Strength (peak) (MPa): Dilation Angle (deg):

Fric. Angle (peak) (deg): Fric. Angle (resid) (deg):

Cohesion (peak) (MPa): Cohesion (resid) (MPa):

Tensile Strength (resid) (MPa):

☐ Stage Properties ☐ Datum Dependent

Unsaturated Shear Strength

Phi b: Air Entry (MPa):

Σχήμα 6.6. Ιδιότητες κατηγορίας IIa

rockmass II

Name: Material Color:

Initial Element Loading: Unit Weight: (MN/m3):

Elastic Properties

Elastic Type: Poisson's Ratio:

Young's Modulus (MPa): ☐ Young's Modulus (resid) (MPa):

E1 (MPa): E2 (MPa): E3 (MPa):

ν_{12} : ν_{13} : ν_{23} :

Strength Parameters

Failure Criterion: Material Type:

Tensile Strength (peak) (MPa): Dilation Angle (deg):

Fric. Angle (peak) (deg): Fric. Angle (resid) (deg):

Cohesion (peak) (MPa): Cohesion (resid) (MPa):

Tensile Strength (resid) (MPa):

☐ Stage Properties ☐ Datum Dependent

Unsaturated Shear Strength

Phi b: Air Entry (MPa):

Σχήμα 6.7. Ιδιότητες κατηγορίας IIβ

rockmass III

Name: Material Color:

Initial Element Loading: Unit Weight: (MN/m3):

Elastic Properties

Elastic Type: Poisson's Ratio:

Young's Modulus (MPa): ☐ Young's Modulus (resid) (MPa):

E1 (MPa): E2 (MPa): E3 (MPa):

ν_{12} : ν_{13} : ν_{23} :

Strength Parameters

Failure Criterion: Material Type:

Tensile Strength (peak) (MPa): Dilation Angle (deg):

Fric. Angle (peak) (deg): Fric. Angle (resid) (deg):

Cohesion (peak) (MPa): Cohesion (resid) (MPa):

Tensile Strength (resid) (MPa):

☐ Stage Properties ☐ Datum Dependent

Unsaturated Shear Strength

Phi b: Air Entry (MPa):

Σχήμα 6.8. Ιδιότητες κατηγορίας III

6.6 Εδαφικές στρώσεις που επιλέχθηκαν

Παρακάτω παρουσιάζονται οι εδαφικές στρώσεις που επιλέχθηκαν για την ανάλυση των μονών και δίδυμων σιηράγγων. Πραγματοποιήθηκαν 6 προσομοιώσεις για διαφορετικά στρώματα εδάφους και συνδυασμό αυτών για τη μονή σήραγγα και 4 προσομοιώσεις για τις δίδυμες. Ανάλογα με την κατηγορία εδάφους στην οποία έγινε η εκσκαφή λήφθηκαν τα αντίστοιχα μέτρα άμεσης υποστήριξης σύμφωνα με τις τυπικές διατομές που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 6.

Πίνακας 6.1. Εδαφικοί παράμετροι για την κατηγορία εδάφους I

Κατηγορία εδάφους I				
E (MPa)	c (MPa)	φ °	γ (MN/m ³)	ν
1400	0,228	53	0,256	0,3

Πίνακας 6.2. Εδαφικοί παράμετροι για την κατηγορία εδάφους II

Κατηγορία εδάφους II				
E (MPa)	c (MPa)	φ °	γ (MN/m ³)	ν
505	0,15	45	0,02	0,3

Πίνακας 6.3. Εδαφικοί παράμετροι για την κατηγορία εδάφους II με 2-στρώματα

	Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα)				
	E (MPa)	c (MPa)	φ °	γ (MN/m ³)	ν
1ο στρώμα	505	0,15	45	0,02	0,3
2ο στρώμα	1400	0,228	53	0,0256	0,3

Πίνακας 6.4. Εδαφικοί παράμετροι για την κατηγορία εδάφους II με 3-στρώματα

	Κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα)				
	E (MPa)	c (MPa)	φ °	γ (MN/m ³)	ν
1ο στρώμα	170	0,083	33	0,02	0,3
2ο στρώμα	340	0,135	44	0,02	0,3
3ο στρώμα	1400	0,228	53	0,0256	0,3

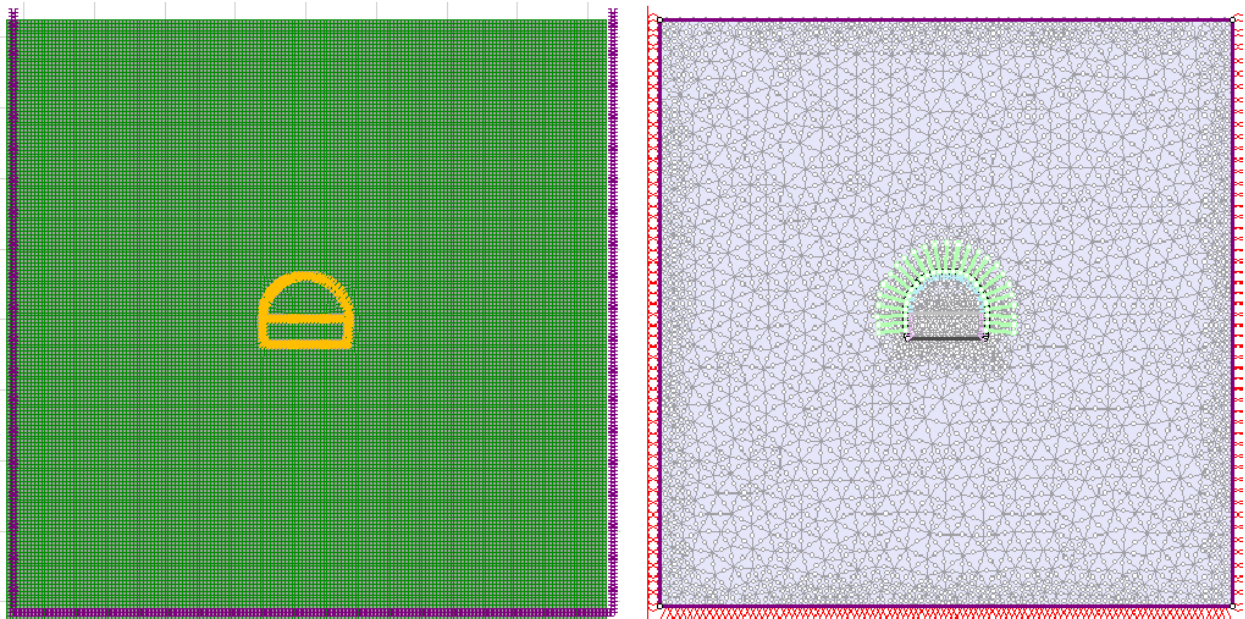
Πίνακας 6.5. Εδαφικοί παράμετροι για την κατηγορία εδάφους II με 2-στρώματα υπό κλίση 26°

	Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα υπό κλίση)				
	E (MPa)	c (MPa)	φ °	γ (MN/m ³)	ν
1ο στρώμα	505	0,15	45	0,02	0,3
2ο στρώμα	1400	0,228	53	0,0256	0,3

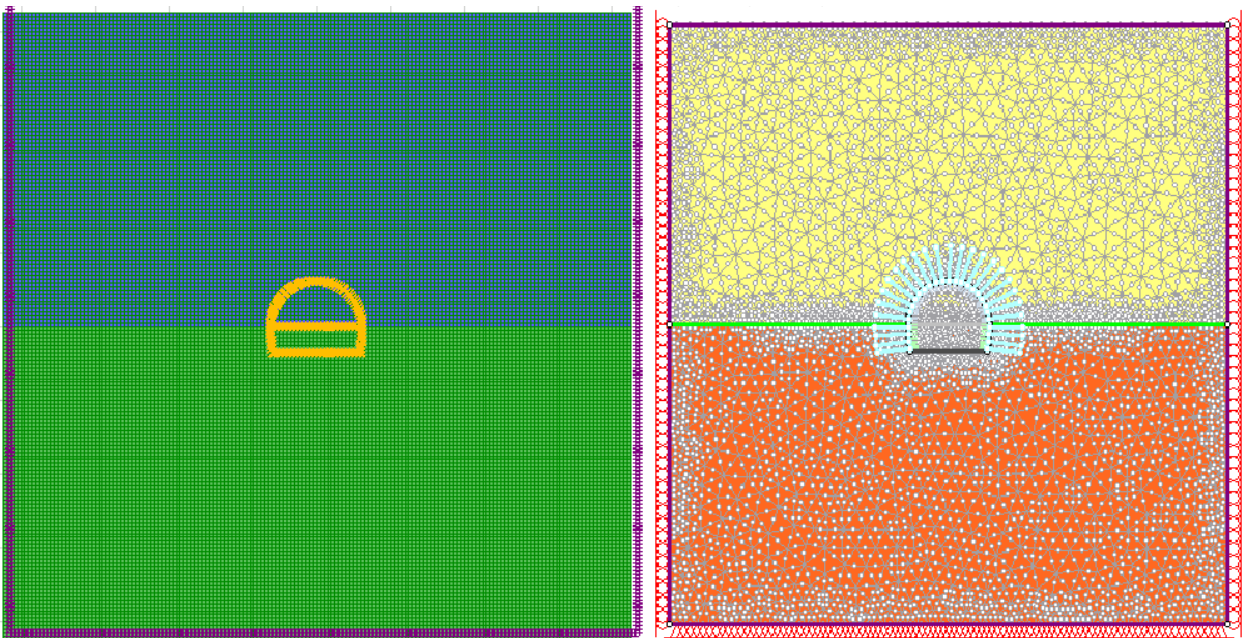
Πίνακας 6.6. Εδαφικοί παράμετροι για την κατηγορία εδάφους II με 3-στρώματα υπό κλίση 26°

	Κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα υπό κλίση)				
	E (MPa)	c (MPa)	φ °	γ (MN/m ³)	ν
1ο στρώμα	170	0,083	33	0,02	0,3
2ο στρώμα	340	0,135	44	0,02	0,3
3ο στρώμα	1400	0,228	53	0,0256	0,3

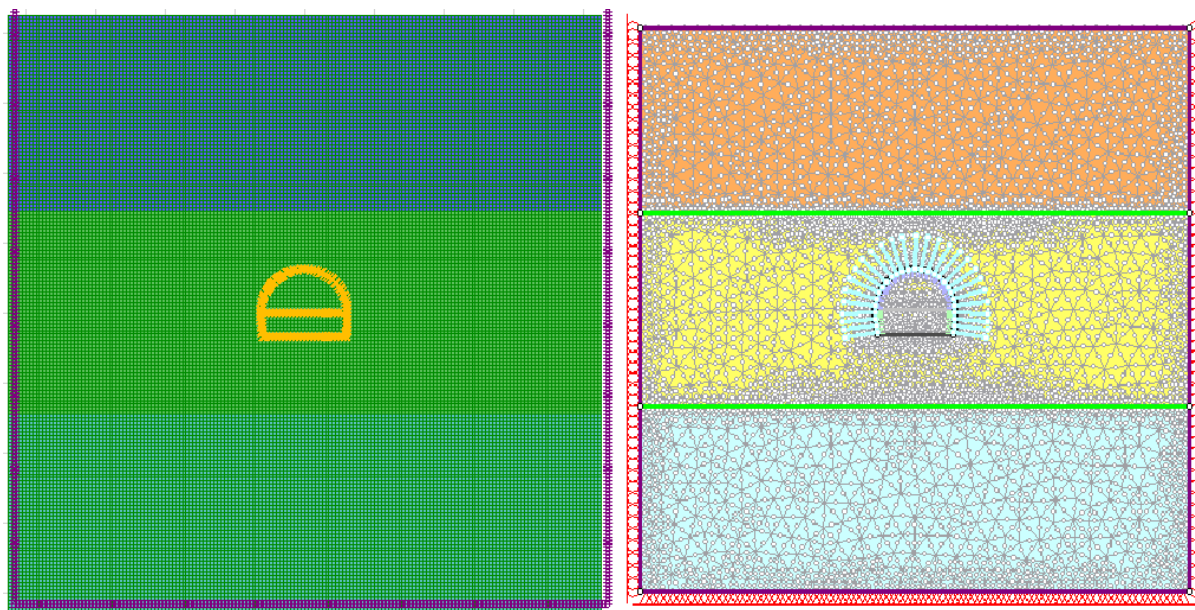
Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται η στρωματογραφία που λήφθηκε υπόψη για τις προσομοιώσεις των σηράγγων στα προγράμματα Flac 7.0 και Phase² 8.0.



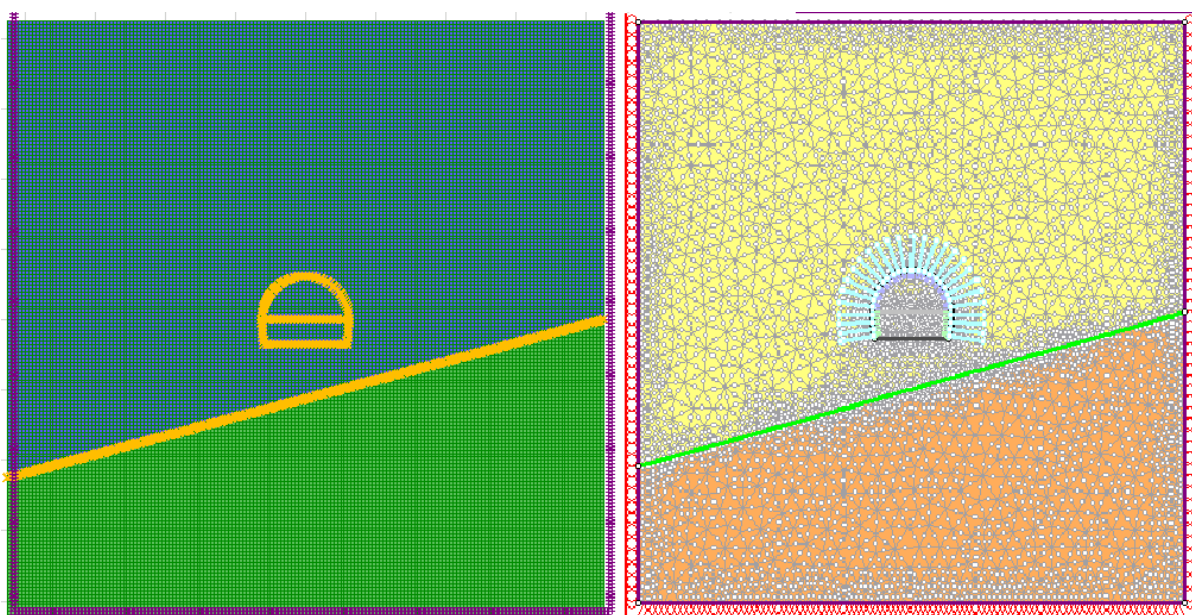
Σχήμα 6.9. Στρωματογραφία κατηγορίας εδάφους I και II. Αριστερά: Flac 7.0 Δεξιά: Phase² 8.0



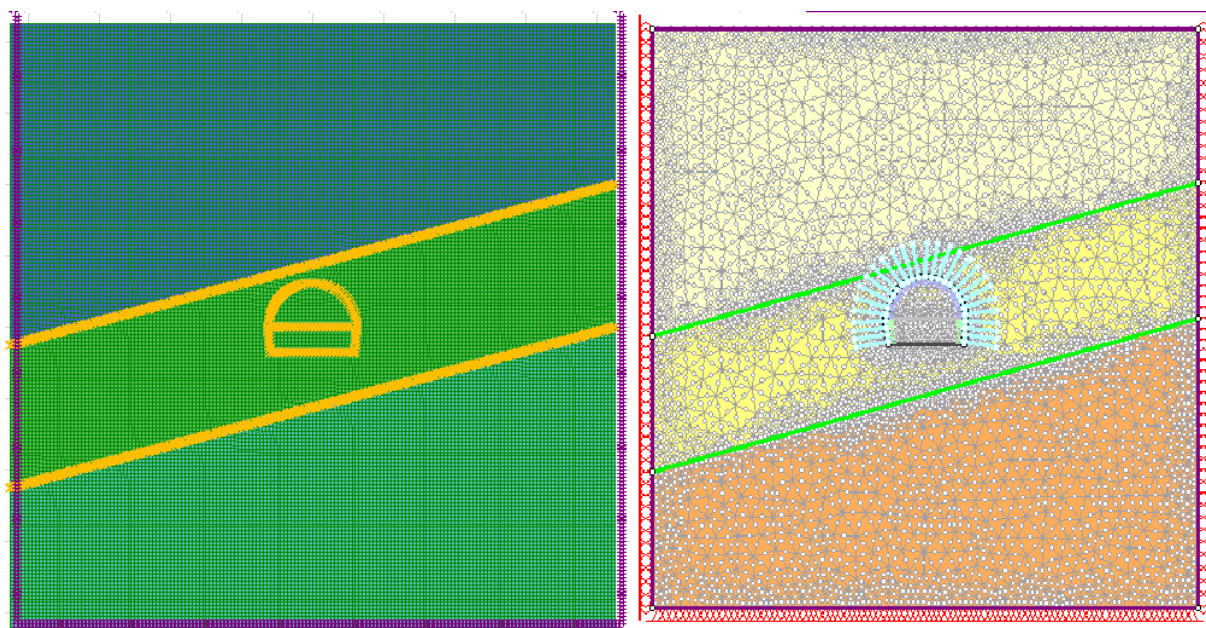
Σχήμα 6.10. Στρωματογραφία κατηγορίας εδάφους II με 2-στρώματα (πάνω πιο ασθενές) αριστερά Flac 7.0 δεξιά: Phase² 8.0



Σχήμα 6.11. Στρωματογραφία κατηγορίας εδάφους II με 3-στρώματα (πάνω το πιο ασθενές) αριστερά: Flac 7.0 δεξιά: Phase² 8.0



Σχήμα 6.12. Στρωματογραφία κατηγορίας εδάφους II με 2-στρώματα υπό κλίση 26° (πάνω το πιο ασθενές) αριστερά: Flac 7.0 δεξιά: Phase² 8.0



Σχήμα 6.13. Στρωματογραφία κατηγορίας εδάφους II με 3-στρώματα υπό κλίση 26° (πάνω το πιο ασθενές) αριστερά: Flac 7.0 δεξιά: Phase² 8.0

6.7 Κριτήριο Αστοχίας

Το κριτήριο αστοχίας που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της αντοχής των βραχομαζών για τις αναλύσεις στα 2 προγράμματα είναι το κριτήριο Mohr-Coulomb. Το κριτήριο αυτό μελετά τις τάσεις σε πιθανά επίπεδα αστοχίας μέσα στο έδαφος. Η αστοχία του εδαφικού υλικού καθορίζεται ως εξής: αν η διατμητική τάση τ σε κάποιο επίπεδο μέσα στο εδαφικό υλικό ξεπεράσει μια κρίσιμη τιμή:

$$\tau = \pm(c' + \sigma' \tan \varphi) \quad (7)$$

Έτσι καθορίζεται ένα ζεύγος από γραμμές στο επίπεδο (σ' , τ) των τάσεων οι οποίες ονομάζονται περιβάλλουσες αστοχίας. Αν ο ενεργός κύκλος του Mohr, για ένα υπολογιζόμενο στοιχείο, τμήσει τις γραμμές αυτές, τότε ξεπερνιέται η μέγιστη διατμητική αντοχή του υλικού και παρατηρείται αστοχία. Δηλαδή για να υπάρξει ολίσθηση στο επίπεδο της αστοχίας πρέπει να η διατμητική τάση να ξεπεράσει την αντίσταση της εσωτερικής τριβής $\sigma' \tan \varphi$ και της συνοχής c' του εδάφους, που εξαρτώνται από την τιμή της ενεργούς τάσης σ' . Η συνοχή c' αντιπροσωπεύεται ως μια μετατόπιση της περιβάλλουσας αστοχίας στο επίπεδο (σ' , τ), (Muirwood, 1990).

6.8 Εντατικό Πεδίο

Για την προσομοίωση του τασικού πεδίου στο πρόγραμμα Flac 7.0, χρησιμοποιήθηκε ο συντελεστής βαρύτητας (επιτάχυνση της βαρύτητας) $g=9.81 \text{ m/s}^2$ και εισήχθησαν μέσω της εντολής `initial` οι γεωστατικές τάσεις, σύμφωνα με τις σχέσεις (1), (2). Με την εντολή `var` ορίζεται η γραμμική μεταβολή των τάσεων σε δεδομένο εύρος.

```
set grav=9.81
ini sy=-1.70e6 var 0,1.70e6 j=1,171
ini sxx=-7.31e5 var 0,7.31e5 j=1,171
ini szz=-7.31e5 var 0,7.31e5 j=1,171
```

Σχήμα 6.14. Εισαγωγή γεωστατικών τάσεων στο Flac 7.0

Στο Phase² 8.0 το τασικό πεδίο προσομοιώνεται βάσει γεωστατικών τάσεων (field stress, type gravity). Το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να εισάγει ο ίδιος την τιμή του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων k και βάσει της σχέσης (2) προσδιορίζει τις οριζόντιες γεωστατικές τάσεις.

Σχήμα 6.15. Εισαγωγή συντελεστή πλευρικών ωθήσεων k για τον υπολογισμό των γεωστατικών τάσεων στο Phase² 8.0

7. Προσομοίωση ανυποστήρικτης σήραγγας

Στη φάση αυτή της ανάλυσης μελετήθηκε η ευστάθεια της σήραγγας με ανυποστήρικτη διατομή και κατασκευάστηκε η καμπύλη αντίδρασης πετρώματος για τις κατηγορίες I και II. Απαραίτητη ενέργεια για το σχεδιασμό της καμπύλης είναι η προσομοίωση του μοντέλου σε δύο καταστάσεις. Στην πρώτη περίπτωση το υλικό της βραχώμαζας προσομοιώνεται ως ελαστικό και προκύπτουν οι ελαστικές παραμορφώσεις, ενώ στη δεύτερη κατάσταση το υλικό έχει παρουσιάσει ελαστοπλαστική συμπεριφορά οπότε και αναπτύσσεται πλαστική ζώνη. Με βάση τα παραπάνω στοιχεία υπάρχει η δυνατότητα να προσδιοριστεί η τιμή της πίεσης κατά την οποία το υλικό μεταβαίνει από την ελαστική στην ελαστοπλαστική κατάσταση.

Η καμπύλη αντίδρασης πετρώματος δείχνει τη σημαντική επιρροή του χρόνου τοποθέτησης των μέτρων άμεσης υποστήριξης και για αυτό το λόγο η σχεδίαση της αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της μελέτης σχεδιασμού κάθε υπόγειου τεχνικού έργου.

7.1 Στάδια προσομοίωσης

Flac 7.0 : Για την εξαγωγή της καμπύλης αντίδρασης πετρώματος ανυποστήρικτης διατομής, η εκσκαφή ολόκληρης της διατομής πραγματοποιήθηκε σε μια φάση. Η διαδικασία της αποτόνωσης της βραχόμαζας που περικλείει το όριο της εκσκαφής επιτυγχάνεται μετρώντας αρχικά την γεωστατική τάση στα τοιχώματα της διατομής σε κατάσταση μηδενικής χαλάρωσης και στη συνέχεια εφαρμόζοντας σταδιακά μια μειωμένη ποσότητα αυτής ως εσωτερική τάση. Επιλέχθηκαν δέκα στάδια προσομοίωσης της αποτόνωσης.

Αρχικά, οι εσωτερικές τάσεις είναι ίσες με τις εξωτερικές και στα επόμενα στάδια αρχίζουν να μειώνονται και μηδενίζονται στο τελευταίο στάδιο, όπου έχει ολοκληρωθεί η αποτόνωση της βραχόμαζας. Πιο συγκεκριμένα, μέσω της λειτουργίας `apply_rf` στον κώδικα `Relax_tractions.fis`, που έχει γραφτεί στη γλώσσα προγραμματισμού FISH, η οποία είναι ενσωματωμένη στο Flac, τοποθετούνται αυτές οι τάσεις στα όρια της σήραγγας. Η συγκεκριμένη λειτουργία αρχικά ανακτά τις κατά x και y δυνάμεις αντίδρασης στους επιλεγμένους κόμβους, που αντιστοιχούν στο όριο της διατομής, και στη συνέχεια εφαρμόζει αυτές ως τάσεις με αντίθετο πρόσημο, χρησιμοποιώντας τις εντολές `Apply xforce` και `Apply yforce`. Η λειτουργία `history` χρησιμοποιείται για τη μείωση των τάσεων γραμμικά εντός ενός συγκεκριμένου διαστήματος βημάτων και ορίζεται ως `relax_hist`.

Για την κατασκευή της καμπύλης αντίδρασης πετρώματος μειώνονται σταδιακά οι εσωτερικές επιφανειακές τάσεις για το σύνολο της διατομής της πεταλοειδούς σήραγγας και καταγράφονται οι αντίστοιχες συγκλίσεις. Η λειτουργία `grc` του FISH χρησιμοποιείται για την αποθήκευση των συγκλίσεων.

```
def relax_ini
  nstart = step
  nstop = nstart + ninc
end
def relax_hist
  if step < nstop
    step_inc = float(step - nstart)
    relax_hist = rstart - ((rstart - rstop)/ float(ninc)) * step_inc
  else
    relax_hist = rstop
  endif
end
def apply_rf
  loop ii (ib_ap,ie_ap)
    loop jj (jb_ap,je_ap)
      if and(flags(ii,jj), 2) = 2 then
        if and(flags(ii,jj), 4) = 4 then
          xftmp = -xforce(ii,jj)
          yftmp = -yforce(ii,jj)
          command
            apply xforce=xftmp hist relax_hist i=ii j=jj
            apply yforce=yftmp hist relax_hist i=ii j=jj
          end_command
        endif
      endif
    endloop
  endloop
end
def relax_tractions
  relax_ini
  relax_hist
  apply_rf
end
```

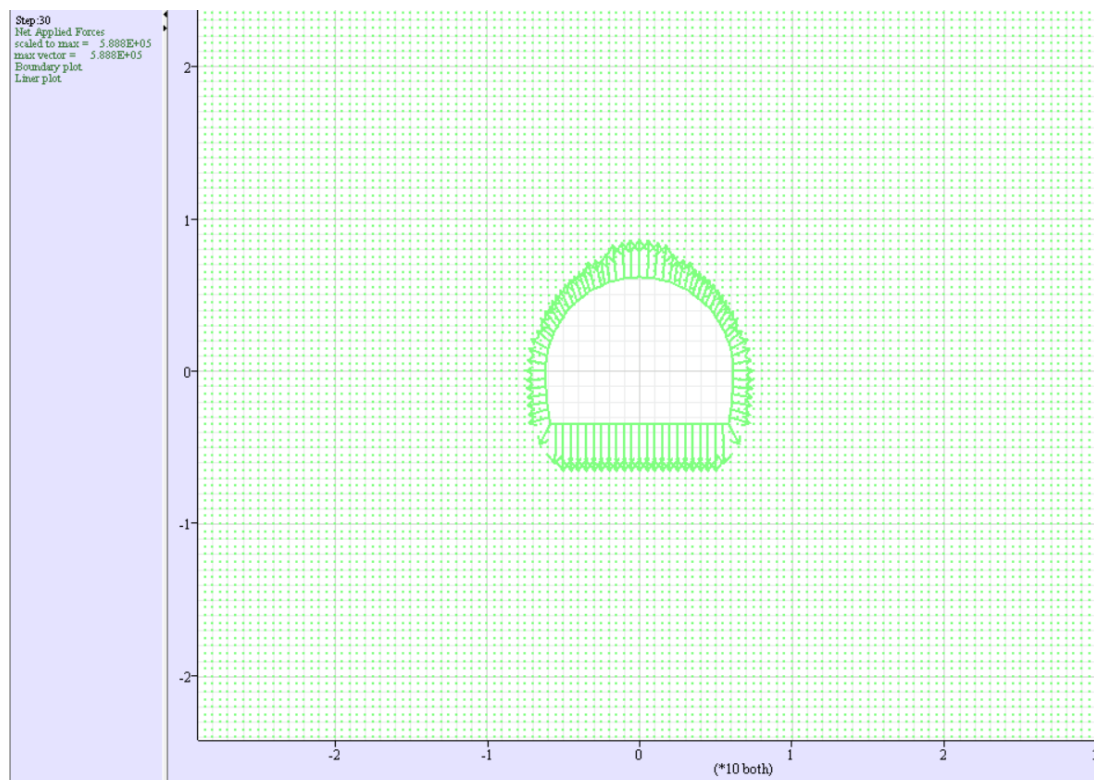
Σχήμα 7.1. Κώδικας relax-tractions

```
;Name:grc
def grc
  xtable(1,isn) = -ydisp(86,98)
  ytable(1,isn) = relax_value
end
```

Σχήμα 7.2. Κώδικας GRC

Πίνακας 7.1. Τιμές του συντελεστή χαλάρωσης για ανυποστήρικτη σήραγγα

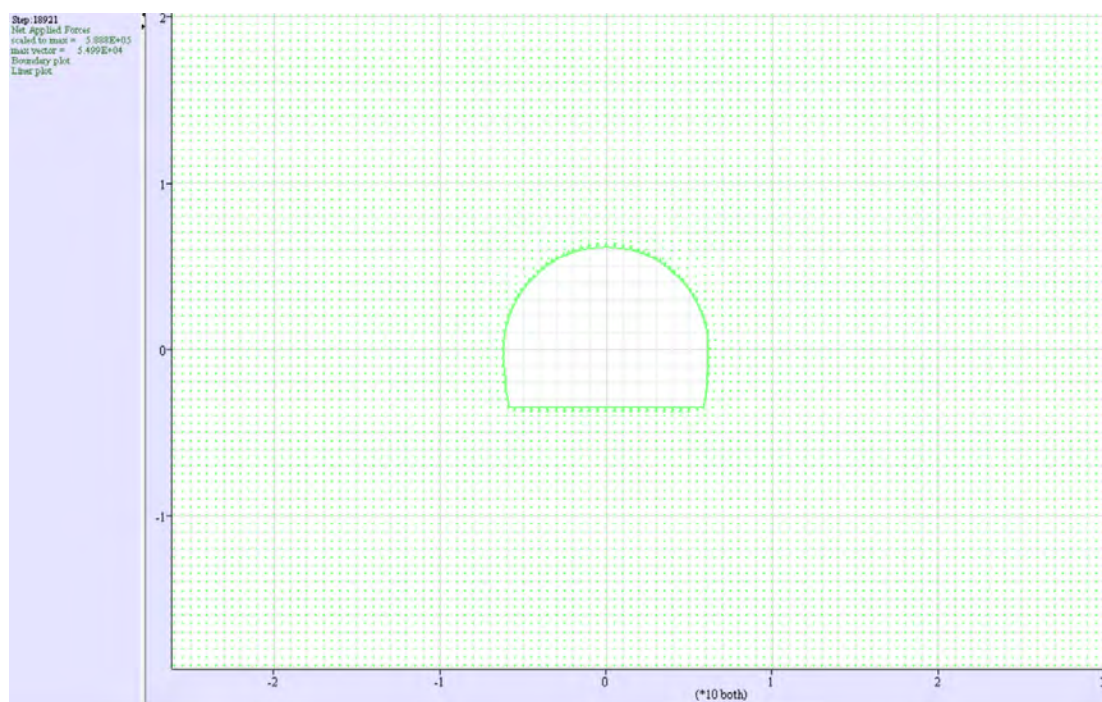
Στάδιο αποτόνωσης	Relax_value
1	1
2	0.8
3	0.4
4	0.2
5	0.1
6	0.08
7	0.04
8	0.02
9	0.01
10	0.0



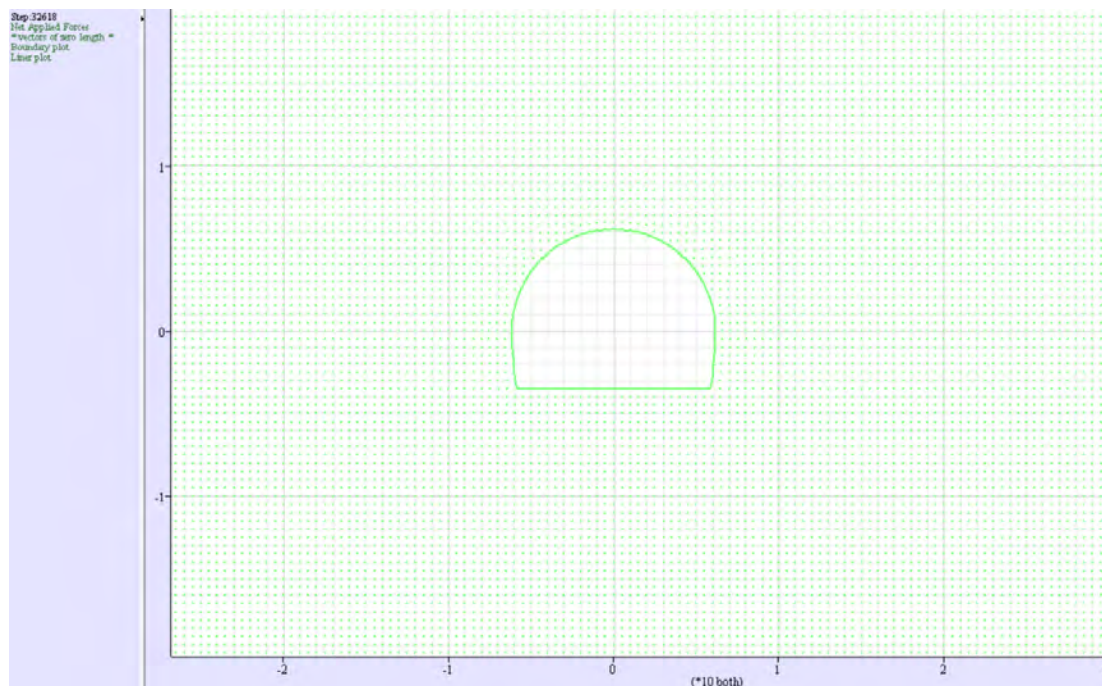
Σχήμα 7.3 : Αποτόνωση βραχύμαζας για ανυποστήρικτη διατομή στο στάδιο 1



Σχήμα 7.4. Αποτόνωση βραχόμαζας για ανυποστήρικτη διατομή στο στάδιο 3



Σχήμα 7.5. Αποτόνωση βραχόμαζας για ανυποστήρικτη διατομή στο στάδιο 6



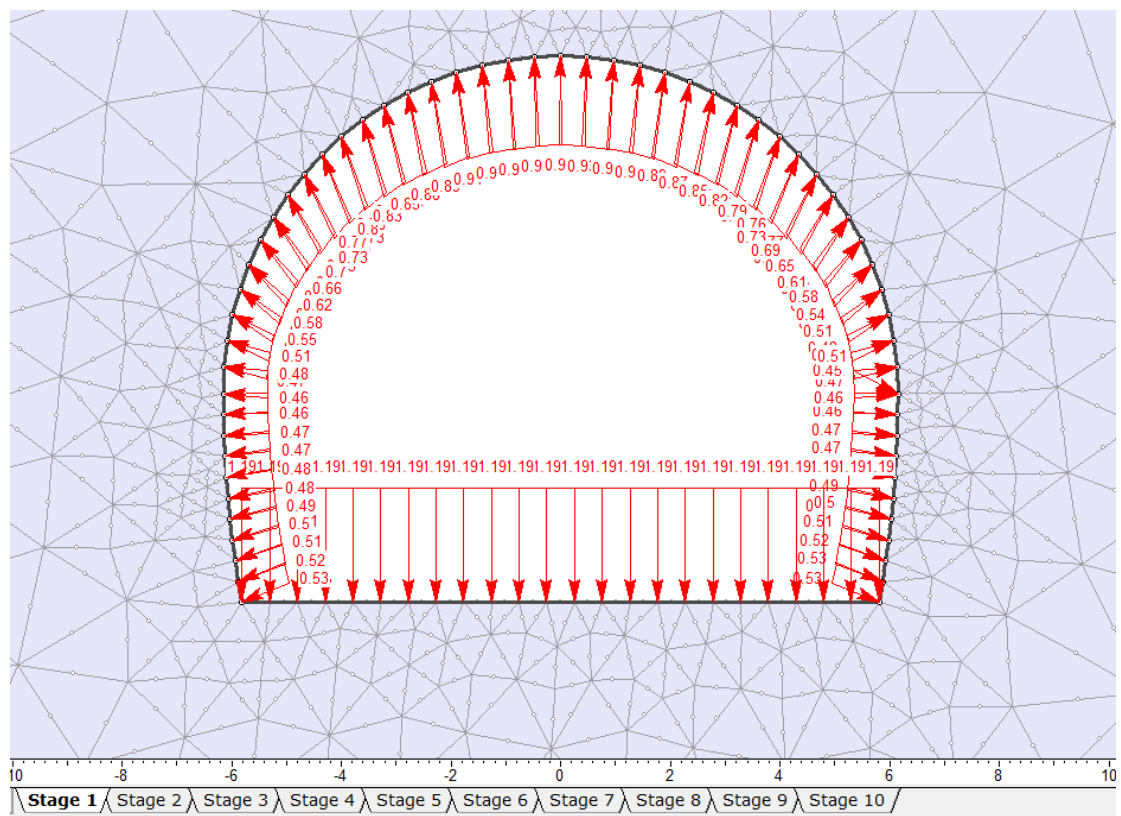
Σχήμα 7.6. Αποτόνωση βραχόμαζας για ανυποστήρικτη διατομή στο στάδιο 10

Phase² 8.0: Το Phase² 8.0 δίνει τη δυνατότητα προσομοίωσης της αποτόνωσης της βραχόμαζας που περικλύει την σήραγγα που πρόκειται να εγκατασταθεί μέσω της τοποθέτησης κατανεμημένου φορτίου στα τοιχώματα. Το συγκεκριμένο κατανεμημένο φορτίο λαμβάνει τιμές σε κάθε θέση ίσες με αυτές του τασικού πεδίου. Οι τιμές του κατανεμημένου φορτίου μπορούν να μειωθούν σε σχέση με αυτές του τασικού πεδίου μέσω της επιλογής stage factor. Η επιλεχθείσα τιμή stage factor είναι ίση με $1-\lambda$. Με αυτόν τον τρόπο προσομοιώνεται η αποτόνωση στα τοιχώματα της σήραγγας.

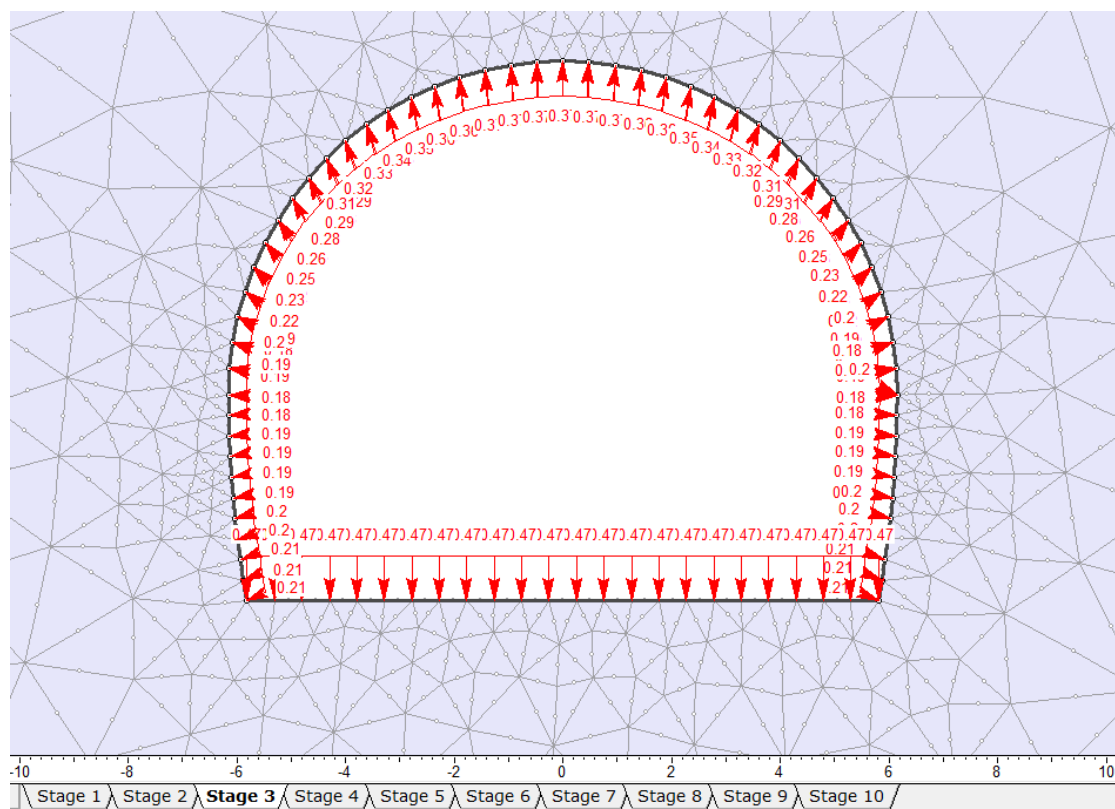
Για τον ακριβέστερο σχεδιασμό της καμπύλης αντίδρασης πετρώματος επιλέχθηκαν δέκα στάδια (Σχήμα 8.7). Στο πρώτο στάδιο οι εσωτερικές δυνάμεις είναι ίσες με τις εξωτερικές και τυπικά δεν έχει αρχίσει ακόμα η αποτόνωση. Στα επόμενα στάδια οι εσωτερικές πιέσεις αρχίζουν να μειώνονται και μηδενίζονται στο τελευταίο στάδιο, όπου έχει ολοκληρωθεί η αποτόνωση της βραχόμαζας. Καταγράφοντας τις ολικές μετατοπίσεις για κάθε στάδιο εκσκαφής στην οροφή της σήραγγας κατασκευάζεται η καμπύλη αντίδρασης του εδάφους. Στα σχήματα 8.8-8.11 φαίνεται η αποτόνωση της βραχόμαζας στα στάδια 1,3,6 και 10.

Stage Factors	
Stage	Factor
1	1
2	0.8
3	0.4
4	0.2
5	0.1
6	0.08
7	0.04
8	0.02
9	0.01
10	0

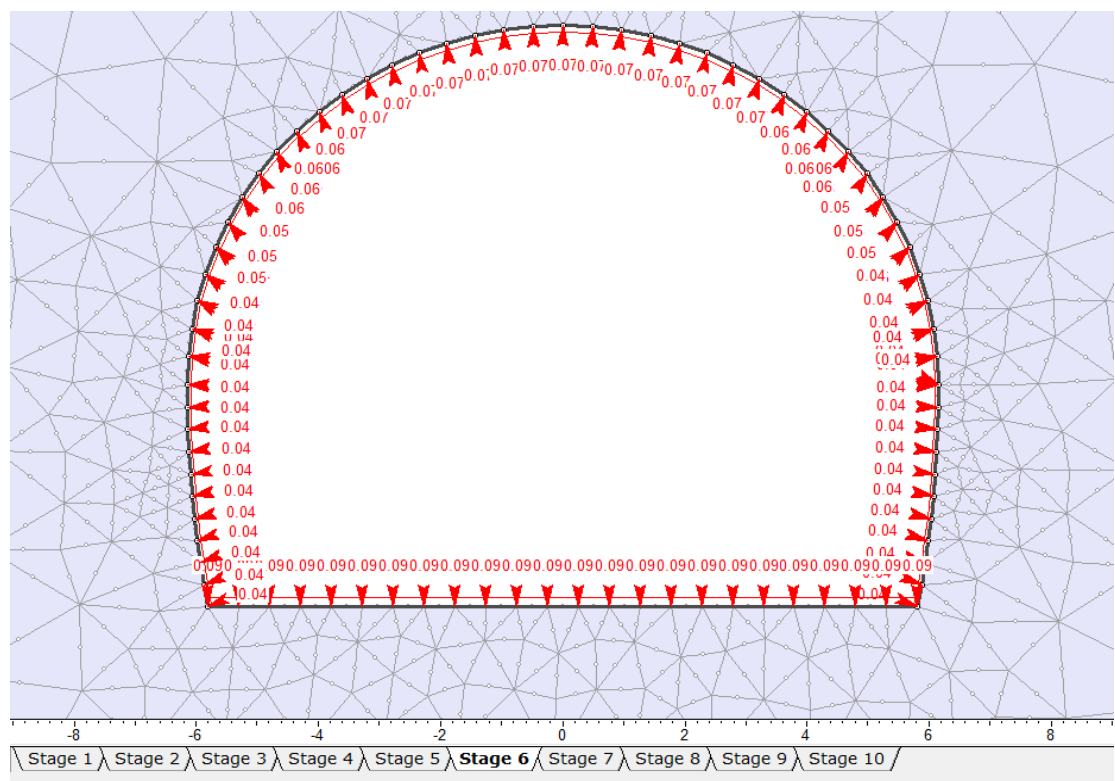
Σχήμα 7.7. Επιλογή συντελεστών αποτόνωσης για ανυποστήρικτη σήραγγα



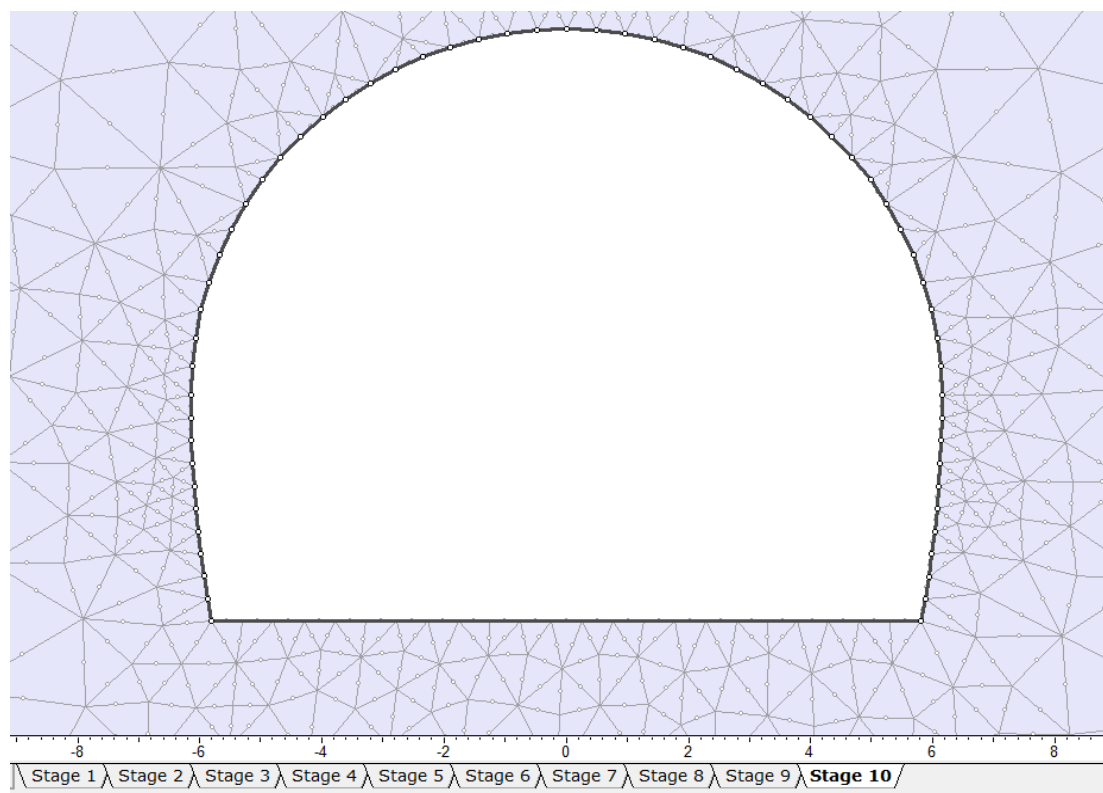
Σχήμα 7.8. Αποτόνωση βραχώμαζας για ανυποστήρικτη διατομή στο στάδιο 1



Σχήμα 7.9. Αποτόνωση βραχύμαζας για ανυποστήρικτη διατομή στο στάδιο 3



Σχήμα 7.10. Αποτόνωση βραχύμαζας για ανυποστήρικτη διατομή στο στάδιο 6



Σχήμα 7.11. Αποτόνωση βραχόμαζας για ανυποστήρικτη διατομή στο στάδιο 10

8. Προσομοίωση διάνοιξης της σήραγγας και τοποθέτηση των μέτρων άμεσης υποστήριξης

8.1 Προσομοίωση των σταδίων εκσκαφής κατά την διάνοιξη της σήραγγας

Σε αυτή την παράγραφο θα προσομοιωθεί η διαδικασία της διάνοιξης της σήραγγας με χρήση φάσεων εκσκαφής και τοποθέτηση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενες παραγράφους η προώθηση του μετώπου και η κατασκευή υποστήριξης της διατομής θα πραγματοποιηθεί βάσει της Νέας Αυστριακής Μεθόδου (NATM). Τα στάδια που προσομοιώθηκαν στο περιβάλλον εργασίας του Flac 7.0 , καθώς και στο περιβάλλον εργασίας του Phase ² 8.0, ορίζονται από χρονικές παραμέτρους αλλά και απαιτήσεις για συγκεκριμένα βήματα εκσκαφής ανάλογα με τις γεωλογικές συνθήκες που επικρατούν.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα στάδια κατασκευής, όπως προσομοιώθηκαν στο περιβάλλον εργασίας του Flac 7.0 και του Phase ² 8.0.

➤ 1^ο στάδιο: Γεωστατικό πεδίο

Στο στάδιο αυτό προσομοιώνονται οι εντατικές καταστάσεις των γεωυλικών στο πεδίο βάσει των μηχανικών τους παραμέτρων.

➤ 2^ο στάδιο: Αποτόνωση βραχόμαζας Α' φάσης

Το στάδιο αυτό αναφέρεται στην εκσκαφή της άνω ημιδιατομής της σήραγγας και στην ελεγχόμενη αποτόνωση της. Η διαδικασία της αποτόνωσης προσομοιώνεται και στα δύο προγράμματα μέσω της εφαρμογής μιας εσωτερικής πίεσης στην περιφέρεια της ημιδιατομής, η οποία είναι αρχικά ισοδύναμη με την αρχική γεωστατική πίεση και στη συνέχεια μειώνεται σταδιακά. Στο συγκεκριμένο στάδιο θεωρείται ότι το μέτωπο της σήραγγας βρίσκεται στη θέση όπου γίνεται η εκσκαφή.

➤ 3^ο , 4^ο , 5^ο στάδιο: Αποτόνωση και υποστήριξη της Α' φάσης

Σε αυτά τα στάδια εφαρμόζονται τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης, ενώ ελέγχεται η αποτόνωση της βραχόμαζας.

➤ 6^ο στάδιο: Ολοκλήρωση της εκσκαφής και υποστήριξης της Α΄ φάσης

Σε αυτό το στάδιο το μέτωπο της σήραγγας έχει απομακρυνθεί από το υπό μελέτη βραχώδες προφίλ. Έχει ολοκληρωθεί η εκσκαφή του θόλου και έχουν τοποθετηθεί όλα τα μέτρα υποστήριξης της Α΄ φάσης.

➤ 7^ο στάδιο: Αποτόνωση βραχώμαζας Β΄ φάσης

Το στάδιο αυτό αναφέρεται στην εκσκαφή της κάτω ημιδιατομής της σήραγγας και στην ελεγχόμενη αποτόνωση της. Στο συγκεκριμένο στάδιο θεωρείται ότι το μέτωπο της σήραγγας βρίσκεται στη θέση όπου γίνεται η εκσκαφή.

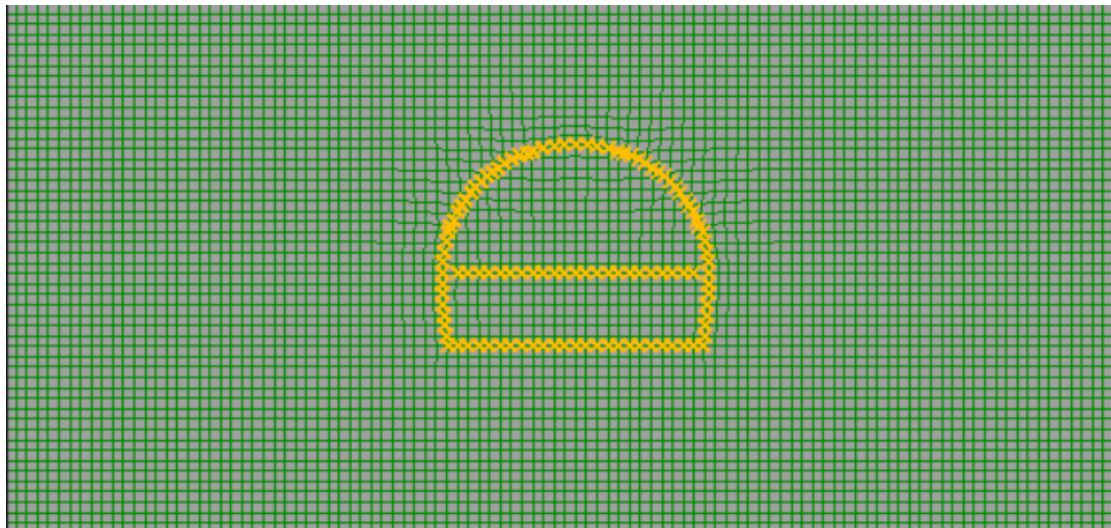
➤ 8^ο, 9^ο, 10^ο στάδιο: Αποτόνωση και υποστήριξη της Β΄ φάσης

Σε αυτά τα στάδια εφαρμόζονται τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης, ενώ ελέγχεται η αποτόνωση της βραχώμαζας.

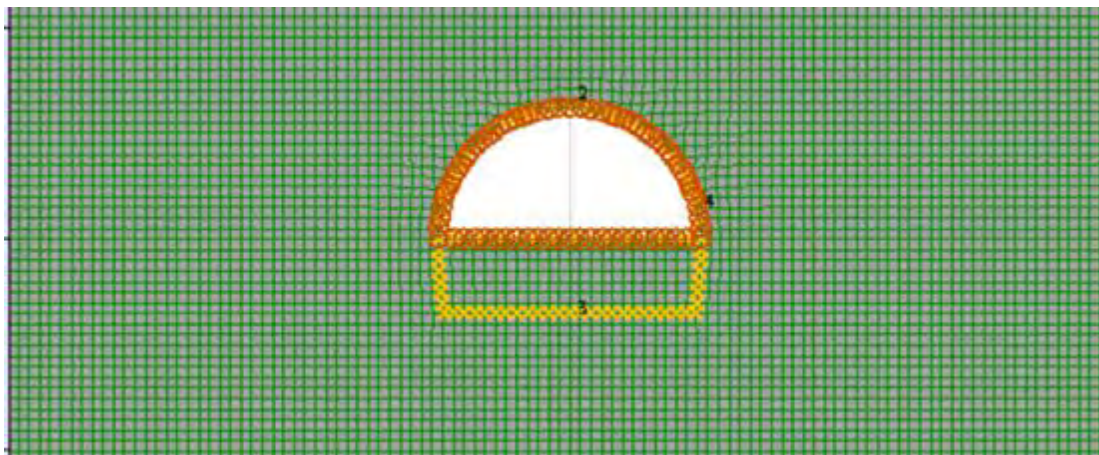
➤ 11^ο στάδιο: Ολοκλήρωση της εκσκαφής και υποστήριξης της Β΄ φάσης

Σε αυτό το στάδιο το μέτωπο της σήραγγας έχει απομακρυνθεί από το υπό μελέτη βραχώδες προφίλ. Έχει ολοκληρωθεί η εκσκαφή των παρειών και του δαπέδου και έχουν τοποθετηθεί όλα τα μέτρα υποστήριξης της Β΄ φάσης. Στο σημείο αυτό ολοκληρώνονται οι συγκλίσεις της σήραγγας.

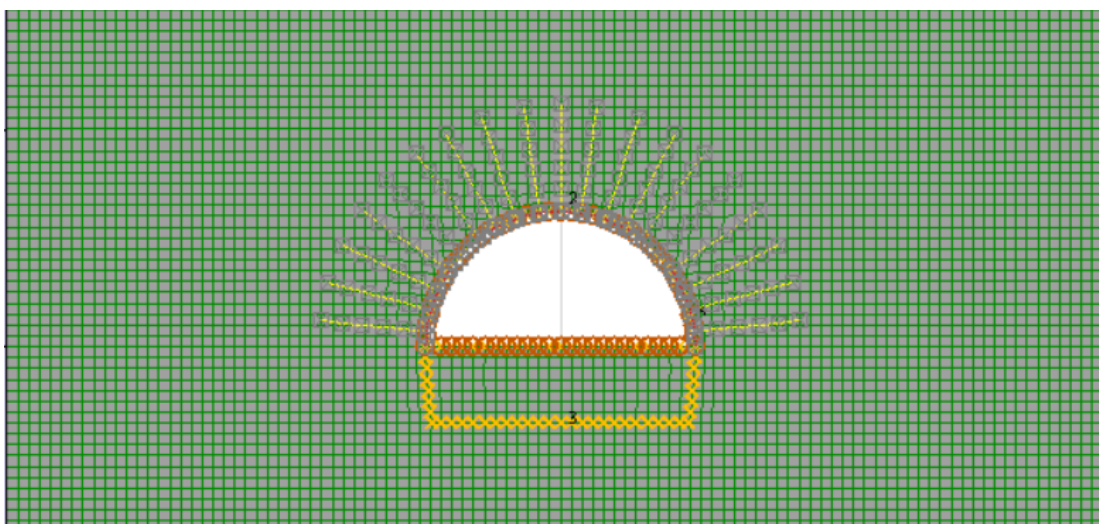
Flac 7.0:



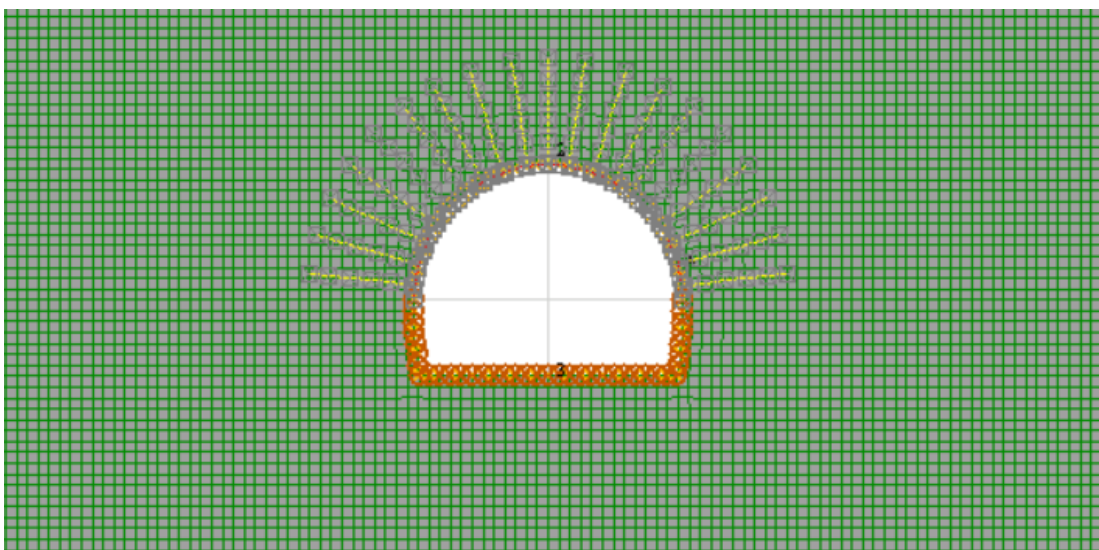
Σχήμα 8.1. 1^ο στάδιο: γεωστατικό πεδίο



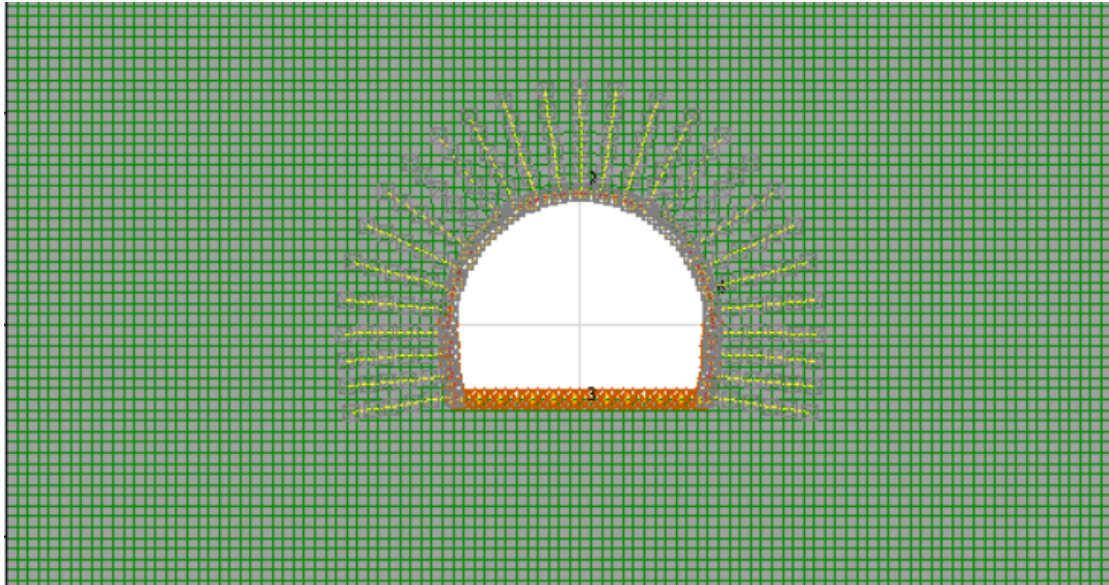
Σχήμα 8.2. 2^ο στάδιο: Αποτόνωση βραχώμαζας Α΄ Φάσης



Σχήμα 8.3. Ολοκλήρωση εκσκαφής και υποστήριξη Α΄ Φάσης

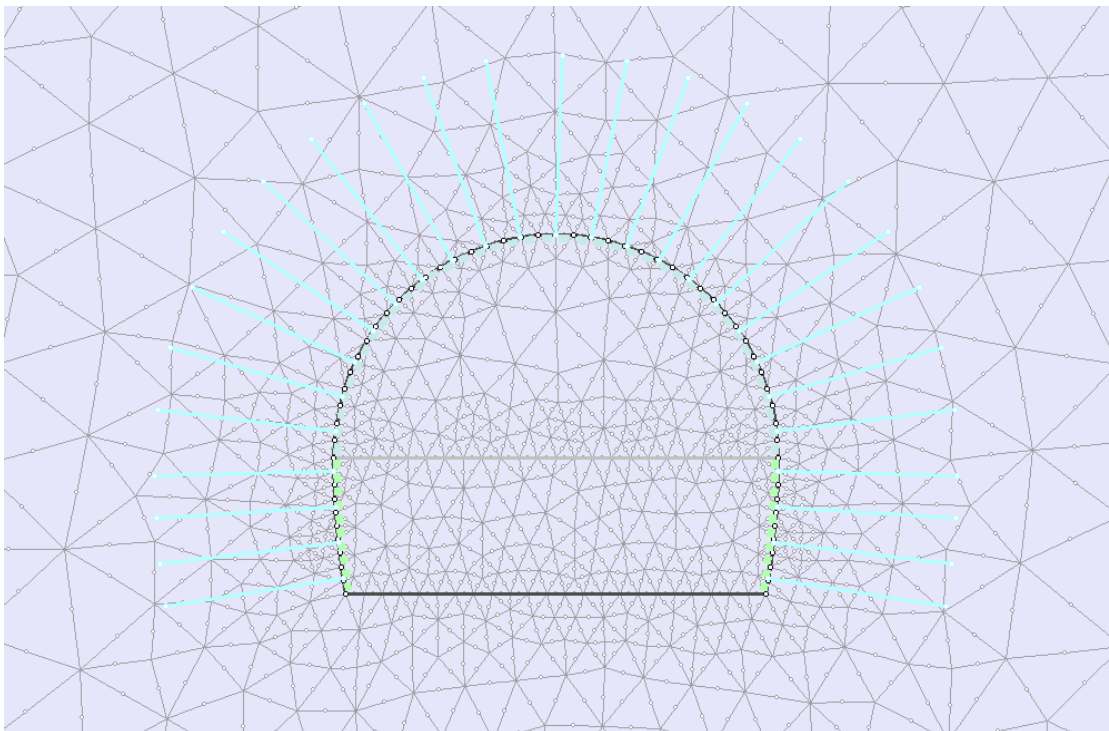


Σχήμα 8.4. 7^ο στάδιο: Αποτόνωση βραχώμαζας Β΄ Φάσης

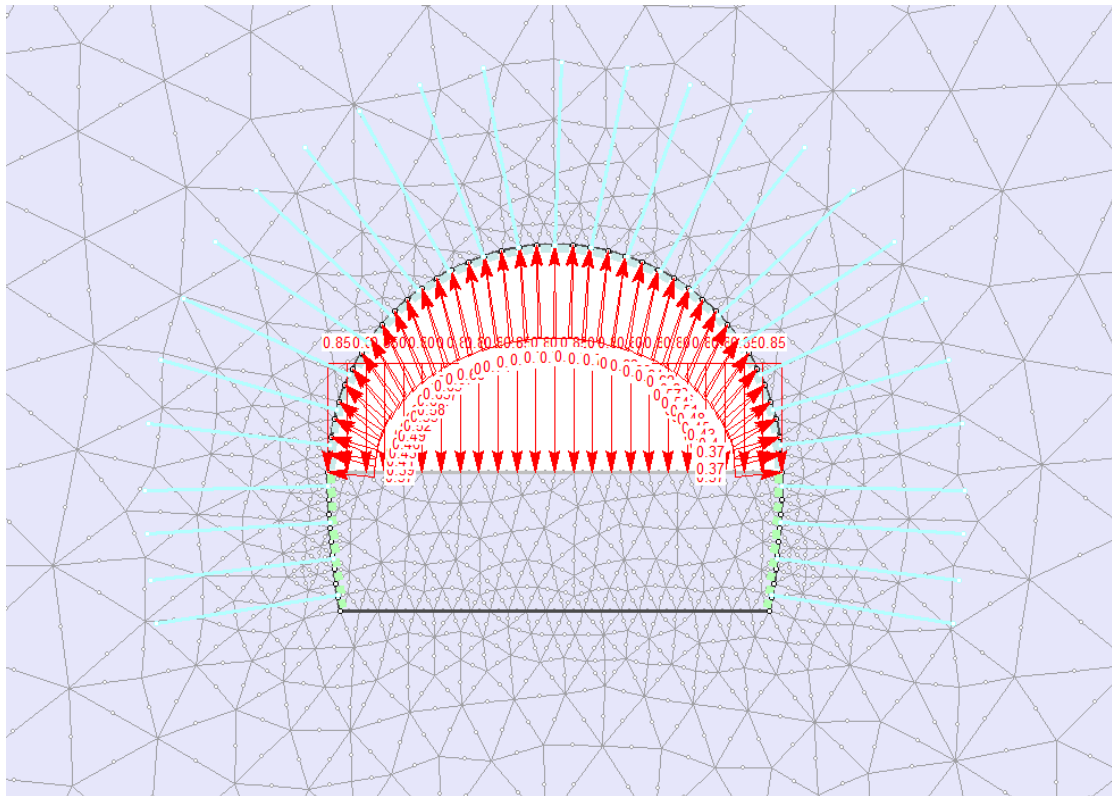


Σχήμα 8.5. Ολοκλήρωση εκσκαφής και υποστήριξη Β' Φάσης

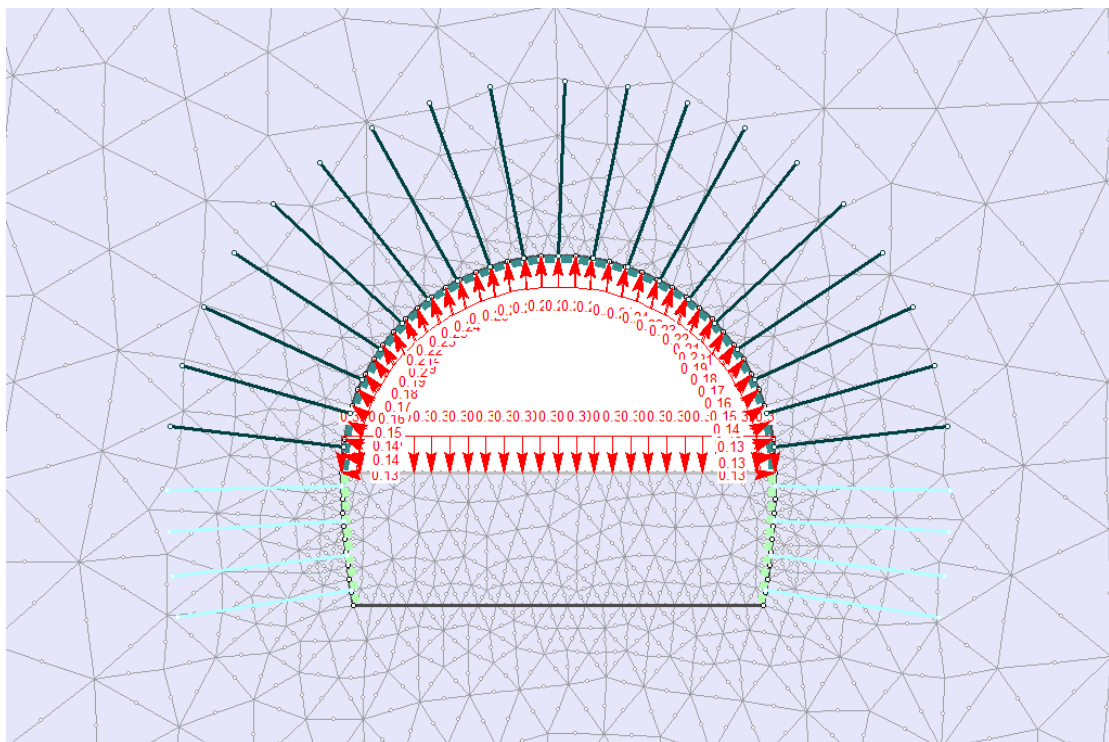
Phase² 8.0 :



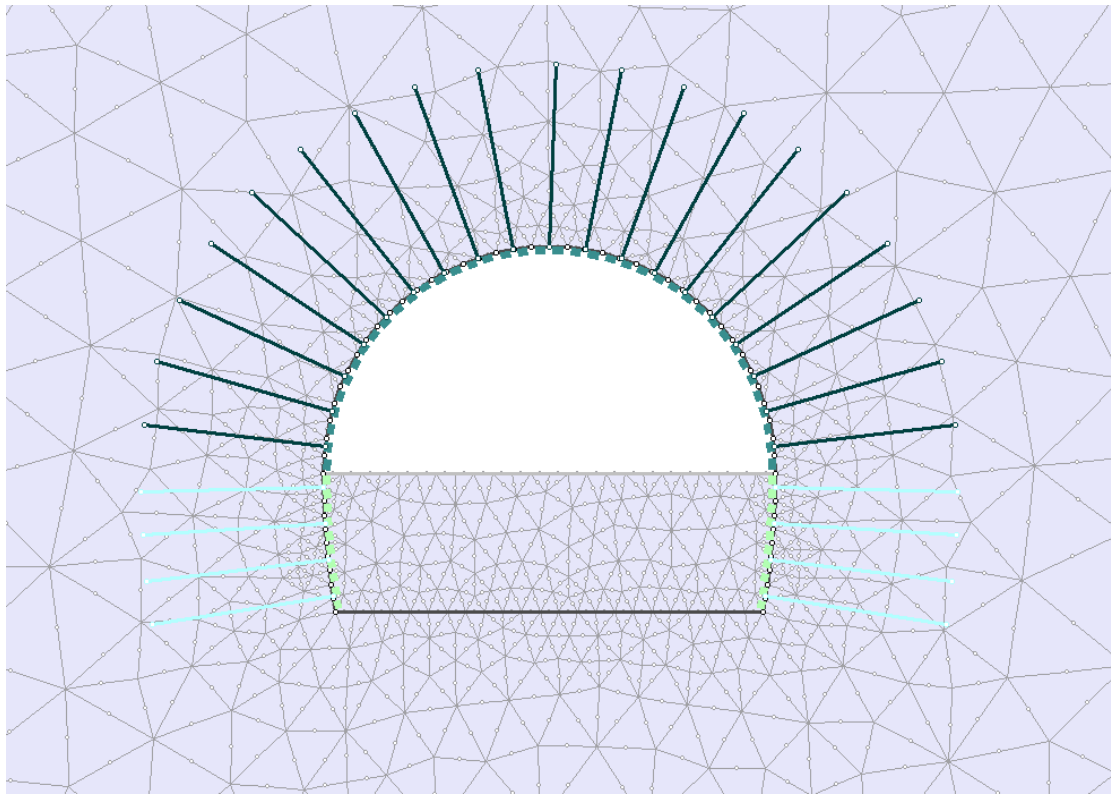
Σχήμα 8.6. 1^ο στάδιο: Γεωστατικό πεδίο



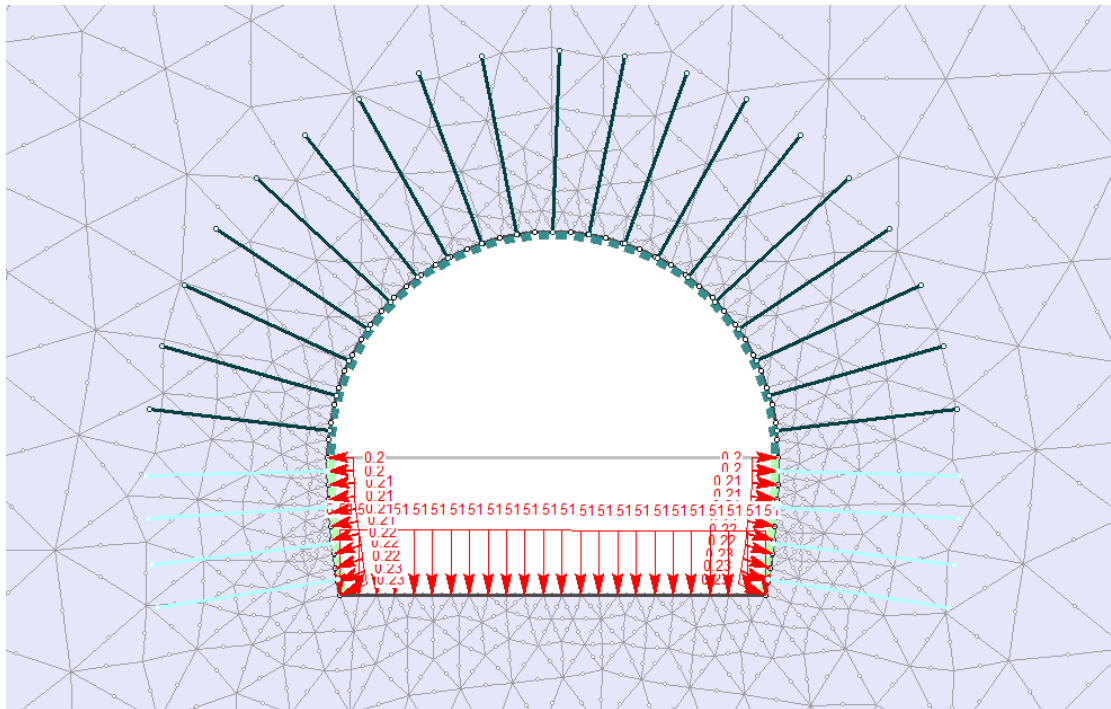
Σχήμα 8.7. 2^ο στάδιο: Αποτόνωση βραχόμαζας Α΄Φάσης



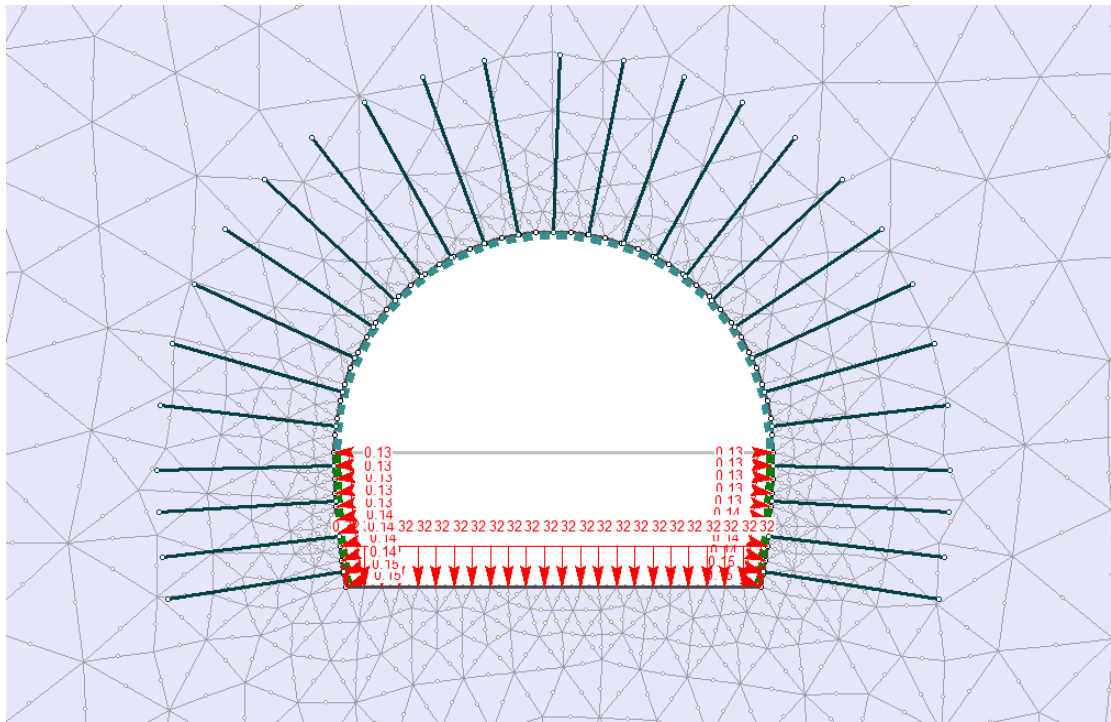
Σχήμα 8.8. Υποστήριξη Α΄Φάσης



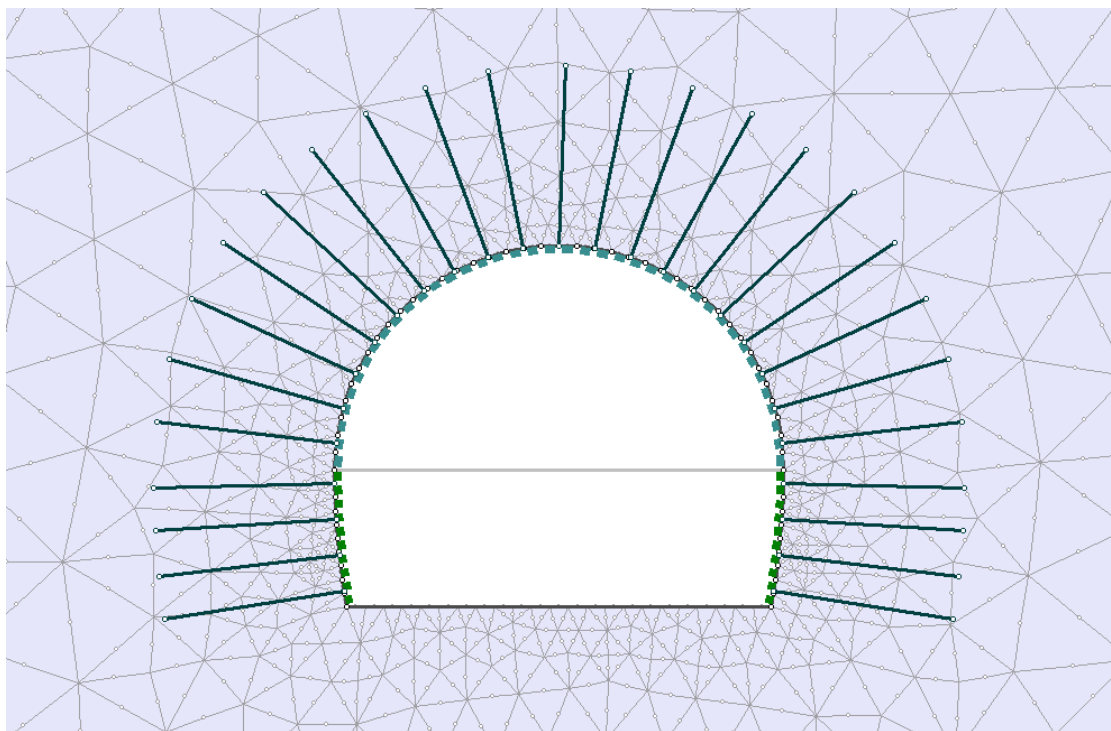
Σχήμα 8.9. Ολοκλήρωση εκσκαφής Α΄Φάσης



Σχήμα 8.10. Αποτόνωση βραχόμαζας Β΄Φάσης



Σχήμα 8.11. Υποστήριξη εκσκαφής Β΄ Φάσης



Σχήμα 8.12. Ολοκλήρωση εκσκαφής Β΄ Φάσης

8.2 Μέτρα Άμεσης Υποστήριξης

Σε αυτήν την παράγραφο παρουσιάζονται τα μέτρα άμεσης υποστήριξης και ο τρόπος προσομοίωσής τους στο περιβάλλον των προγραμμάτων Flac 7.0 και Phase² 8.0.

8.2.1 Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα

Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα τοποθετείται περιμετρικά της διατομής κατά την υποστήριξη των Α' και Β' φάσεων.

Flac 7.0 : Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα εισάγεται στο μοντέλο με στοιχεία δοκού (beam elements). Η συνεργασία βράχου και μέτρων υποστήλωσης επιτυγχάνεται μέσω κοινών κόμβων οι οποίοι μεταφέρουν δυνάμεις αλλά όχι ροπές. Ελήφθησαν πρόσθετα ενδιάμεσα στάδια προσομοίωσης των μέτρων υποστήλωσης, κατά τα οποία λαμβάνονται απομειωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, καθώς και διαφορετικά πάχη φορέα προσωρινής υποστήλωσης. Τα beam elements εισάγονται στο πρόγραμμα με την εντολή struct beam.

Πίνακας 8.1. Ιδιότητες εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε κάθε στάδιο εκσκαφής στο Flac 7.0

Διατομή Α	
Φάση εκσκαφής	Ιδιότητες δοκού (beam properties)
1	
2	struct prop 1001 e 5e9 area 0.05 I 1.0417e-5
3	struct prop 1001 e 10e9
4	struct prop 1001 e 15e9 area 0.1 I 8.333-5
5	struct prop 1001 e 25e9 area 0.15 I 2.8125e-4

Διατομή Β	
Φάση εκσκαφής	Ιδιότητες δοκού (beam properties)
1	
2	struct prop 1001 e 5e9 area 0.05 I 1.0417e-5
3	struct prop 1001 e 10e9
4	struct prop 1001 e 15e9 area 0.15 I 2.8125e-4
5	struct prop 1001 e 25e9 area 0.2 I 6.6667e-4

Phase² 8.0 : Η τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος εισάγεται στο πρόγραμμα με χρήση liners. Έχει επιλεχθεί μέτρο ελαστικότητας 5 GPa και μέτρο Poisson 0.2, ενώ με την εντολή Stage liner properties -> Define factors προσομοιώνονται τα χαρακτηριστικά του στα διάφορα στάδια εισαγωγής.

Staged Liner Properties

Stage	Area	Moment of Inertia	Young's Modulus	Poisson's Ratio
4	1	1	1	1
5	1	1	2	1
6	3	26.999	3	1
7	4	63.998	5	1

Summary of Properties

Liner 1
 Liner Type: Standard Beam
 Formulation: Timoshenko
 Geometry:
 Area: 0.05 m2
 Moment of Inertia: 1.0417e-005 m4
 Elastic properties:
 Young's modulus: 5000 MPa
 Poisson's ratio: 0.2
Properties changed in Stage 5
 Young's modulus: 10000 MPa (factor = 2)
Properties changed in Stage 6
 Area: 0.15 m2 (factor = 3)
 Moment of Inertia: 0.000281249 m4 (factor = 26.99)
 Young's modulus: 15000 MPa (factor = 3)
Properties changed in Stage 7
 Area: 0.2 m2 (factor = 4)
 Moment of Inertia: 0.000666667 m4 (factor = 63.99)
 Young's modulus: 25000 MPa (factor = 5)

Σχήμα 8.13. Ιδιότητες εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε κάθε στάδιο εκσκαφής στο Phase² 8.0

Στη διατομή B όπου εισάγονται και μεταλλικά πλαίσια HEB 120, η τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πραγματοποιείται με την επιλογή composite liners η οποία παρέχει τη δυνατότητα προσομοίωσης διαφορετικών στρώσεων εκτοξευόμενου σκυροδέματος οι οποίες μπορούν να περιέχουν χαλύβδινα πλαίσια και να εγκαθίστανται σε διαφορετικά στάδια υποστήριξης.

8.2.2 Αγκύρια Βράχου

Flac 7.0 : Τα αγκύρια προσομοιώνονται με στοιχεία καλωδίου (cable elements). Η συνεργασία βράχου και μέτρων υποστύλωσης επιτυγχάνεται μέσω κοινών κόμβων οι οποίοι μεταφέρουν δυνάμεις αλλά όχι ροπές.

```
struct prop 2001 e 2E11 area 5.0E-4 spacing 1.5 yield 200000.0  
struct prop 2001 sfriction 30.0 kbond 8.0E9 sbond 80000.0 perimeter 0.4
```

Σχήμα 8.14. Εισαγωγή και ιδιότητες αγκυρίων στο Flac 7.0

Phase² 8.0 : Τα αγκύρια προσομοιώνονται μέσω της επιλογής Define Bolts, εισάγοντας τη γεωμετρία τους, την ποιότητα του χάλυβα και τη φέρουσα ικανότητα τους. Στη διατομή της σήραγγας τοποθετούνται με τη βοήθεια της επιλογής Add Bolt Pattern, η οποία δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει το μήκος των αγκυρίων, το διάστημα (m) στο οποίο θα τοποθετηθεί το ένα αγκύριο από το άλλο και το στάδιο στο οποίο θα εισαχθούν.

Bolt 1

Name: Bolt 1 Bolt Color: [Dark Green]

Bolt Properties

Bolt Type: Fully Bonded

Bolt Diameter (mm): 25

Bolt Modulus, E (MPa): 200000

Tensile Capacity (MN): 0.2

Residual Tensile Capacity (MN): 0

Out-of-plane Spacing (m): 1.5

Face Plates

☐ Attached Face Plates

☐ Add Pull-Out Force

Force (MN): 0

☐ Constant Shear Stiffness

Stiffness (MN/m/m): 0

☐ Add Bulges

Define Bulges ...

Add Bolt Pattern ? X

Bolt Property: Bolt 1

Orientation

☒ Normal to boundary

☐ Radial (from drilling point)

☐ Angle from horizontal

0

Bolt Length (m): 5

In-Plane Spacing (m): 1

Staging

Install at stage: 5

☐ Remove at stage: 22

Σχήμα 8.15. Εισαγωγή αγκυρίων στο Phase² 8.0

8.2.3 Μεταλλικά Πλαίσια

Flac 7.0 : Τα μεταλλικά πλαίσια εισήχθησαν κατά τον ίδιο τρόπο με το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα μέσω beam elements.

```
struct prop 1002 e 2E11 area 0.003401 I 8.644E-6  
struct prop 1002 spacing 1.5 syield 4.0E8 sycomp 4.0E8
```

Σχήμα 8.16. Εισαγωγή μεταλλικών πλαισίων HEB στο Flac 7.0

Phase² 8.0 : Στο πρόγραμμα υπάρχει βιβλιοθήκη και παρέχεται η δυνατότητα στο χρήστη άμεσης επιλογής των μεταλλικών χαλύβδινων πλαισίων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την υποστήριξη της διατομής. Σημειώνεται πως το πρόγραμμα δέχεται ως παραμέτρους τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και του χαλύβδινου πλαισίου υπολογίζοντας μια νέα διατομή η οποία φέρει ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας E_{eq} και ισοδύναμο πάχος t_{eq} .

Shape:	Type:
I-beam	W
Lattice girder	M
Hollow section	S
Rebar	HP
Wire Mesh	HE Europe
Channel	
Dbl Channel	

Designation (Metric)
HE 100 AA
HE 100 A
HE 100 B
HE 100 M
HE 120 AA
HE 120 A
HE 120 B
HE 120 M
HE 140 AA
HE 140 A
HE 140 B
HE 140 M
HE 160 AA
HE 160 A
HE 160 B

Property	Value
Section Depth (mm):	120
Area (mm2):	3401
Moment of Inertia (10e6mm4):	8.644
Weight (kg/m):	26.7

☐ Imperial ☒ Metric

Σχήμα 8.17. Εισαγωγή μεταλλικών πλαισίων στο Phase² 8.0

8.3 Προσομοίωση των σταδίων τοποθέτησης των μέτρων άμεσης υποστήριξης

Σε αυτό το στάδιο της ανάλυσης λαμβάνεται υπόψη το γεγονός ότι κατά την κατασκευή της σήραγγας απαιτούνται πολλαπλά στάδια εκσκαφής και υποστήριξης. Στους πίνακες που ακολουθούν δίνονται συνοπτικά τα βήματα προσομοίωσης εκσκαφής και προσωρινής υποστήλωσης για κάθε διατομή.

Πίνακας 8.2. Βήματα προσομοίωσης εκσκαφής και προσωρινής υποστήλωσης για τις διατομές Α και Β (Εγνατία οδός Α.Ε., 2011)

Διατομή	Φάσεις	λ%	Σύστημα Προσωρινής Υποστήλωσης
Α	0	-	- (αρχική εντατική κατάσταση)
	ΦΑΣΗ Α (Άνω ημιδιατομή) – Κλάδος Α (Αριστερός κλάδος)		
	I-1	45%	- (αποτόνωση)
	I-2	55%	5cm εκτοξ. σκυρόδεμα ($E_{σκ}=5\text{GPa}$)
	I-3	65%	Αγκύρια 4m ($E_{σκ}=10\text{GPa}$)
	I-4	75%	15cm εκτοξ. σκυρόδεμα ($E_{σκ}=15\text{GPa}$)
	I-5	100%	15cm εκτοξ. σκυρόδεμα ($E_{σκ}=25\text{GPa}$)
	ΦΑΣΗ Α (Άνω ημιδιατομή) – Κλάδος Β (Δεξιός κλάδος)		
	II-1	45%	- (αποτόνωση)
	II-2	55%	5cm εκτοξ. σκυρόδεμα ($E_{σκ}=5\text{GPa}$)
	II-3	65%	Αγκύρια 4m ($E_{σκ}=10\text{GPa}$)
	II-4	75%	15cm εκτοξ. σκυρόδεμα ($E_{σκ}=15\text{GPa}$)
	II-5	100%	15cm εκτοξ. σκυρόδεμα ($E_{σκ}=25\text{GPa}$)
	ΦΑΣΗ Β (Βαθμίδα) – Κλάδος Α (Αριστερός κλάδος)		
	III-1	45%	- (αποτόνωση)
	III-2	55%	5cm εκτοξ. σκυρόδεμα ($E_{σκ}=5\text{GPa}$)
	III-3	65%	10cm εκτοξ. σκυρόδεμα ($E_{σκ}=15\text{GPa}$)
	III-4	100%	15cm εκτοξ. σκυρόδεμα ($E_{σκ}=25\text{GPa}$)
	ΦΑΣΗ Β (Βαθμίδα) – Κλάδος Β (Δεξιός κλάδος)		
	IV-1	45%	- (αποτόνωση)

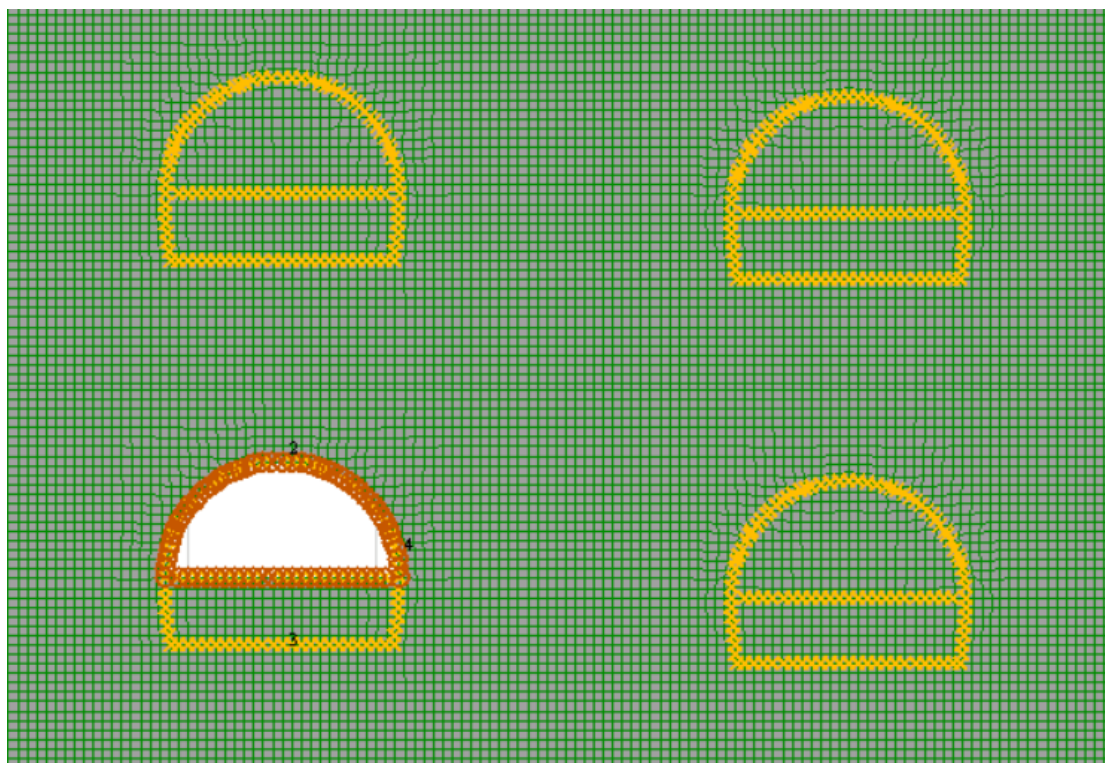
	IV-2	55%	5cm εκτοξ. σκυρόδεμα ($E_{σκ}=5\text{GPa}$)
	IV-3	65%	10cm εκτοξ. σκυρόδεμα ($E_{σκ}=15\text{GPa}$)
	IV-4	100%	15cm εκτοξ. σκυρόδεμα ($E_{σκ}=25\text{GPa}$)

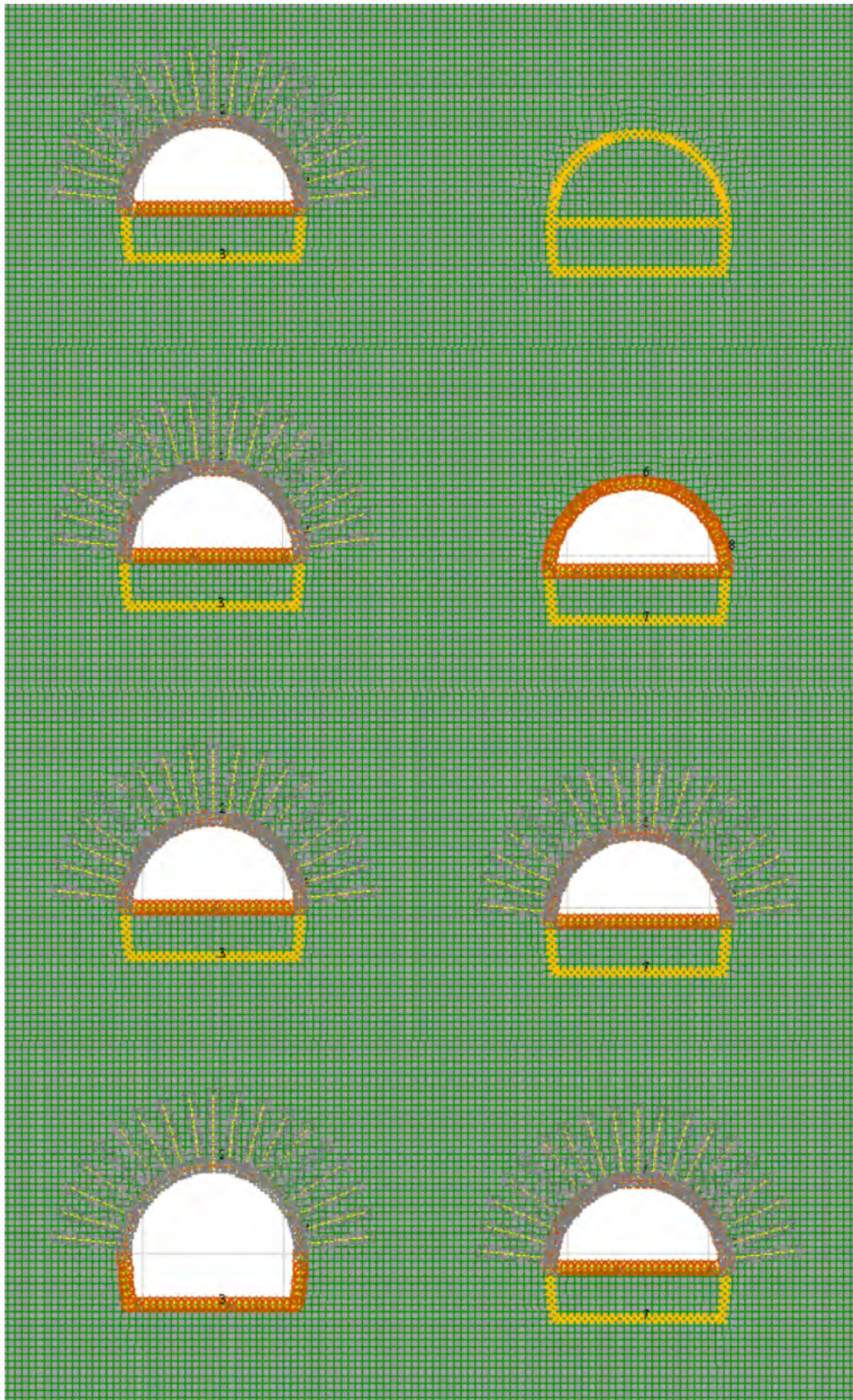
Διατομή	Φάσεις	λ%	Σύστημα Προσωρινής Υποστήλωσης
B	0	-	- (αρχική εντατική κατάσταση)
	ΦΑΣΗ A (Ανω ημιδιατομή) – Κλάδος A (Αριστερός κλάδος)		
	I-1	45%	- (αποτόνωση)
	I-2	55%	5cm εκτοξ. σκυρόδεμα ($E_{σκ}=5\text{GPa}$)
	I-3	65%	Μεταλλικά πλαίσια HEB120 + αγκύρια 5m ($E_{σκ}=10\text{GPa}$)
	I-4	75%	15cm εκτοξ. σκυρόδεμα ($E_{σκ}=15\text{GPa}$)
	I-5	100%	20cm εκτοξ. σκυρόδεμα ($E_{σκ}=25\text{GPa}$)
	ΦΑΣΗ A (Ανω ημιδιατομή) – Κλάδος B (Δεξιός κλάδος)		
	II-1	45%	- (αποτόνωση)
	II-2	55%	5cm εκτοξ. σκυρόδεμα ($E_{σκ}=5\text{GPa}$)
	II-3	65%	Μεταλλικά πλαίσια HEB120 + αγκύρια 5m ($E_{σκ}=10\text{GPa}$)
	II-4	75%	15cm εκτοξ. σκυρόδεμα ($E_{σκ}=15\text{GPa}$)
	II-5	100%	20cm εκτοξ. σκυρόδεμα ($E_{σκ}=25\text{GPa}$)
	ΦΑΣΗ B (Βαθμίδα) – Κλάδος A (Αριστερός κλάδος)		
	III-1	45%	- (αποτόνωση)
	III-2	55%	5cm εκτοξ. σκυρόδεμα ($E_{σκ}=5\text{GPa}$)
	III-3	65%	Μεταλλικά πλαίσια HEB120 + αγκύρια 5m ($E_{σκ}=10\text{GPa}$)
	III-4	75%	15cm εκτοξ. σκυρόδεμα ($E_{σκ}=15\text{GPa}$)
	III-5	100%	20cm εκτοξ. σκυρόδεμα ($E_{σκ}=25\text{GPa}$)
	ΦΑΣΗ B (Βαθμίδα) – Κλάδος B (Δεξιός κλάδος)		
	IV-1	45%	- (αποτόνωση)
	IV-2	55%	5cm εκτοξ. σκυρόδεμα ($E_{σκ}=5\text{GPa}$)
	IV-3	65%	Μεταλλικά πλαίσια HEB120 + αγκύρια 5m ($E_{σκ}=10\text{GPa}$)
	IV-4	75%	15cm εκτοξ. σκυρόδεμα ($E_{σκ}=15\text{GPa}$)
	IV-5	100%	20cm εκτοξ. σκυρόδεμα ($E_{σκ}=25\text{GPa}$)

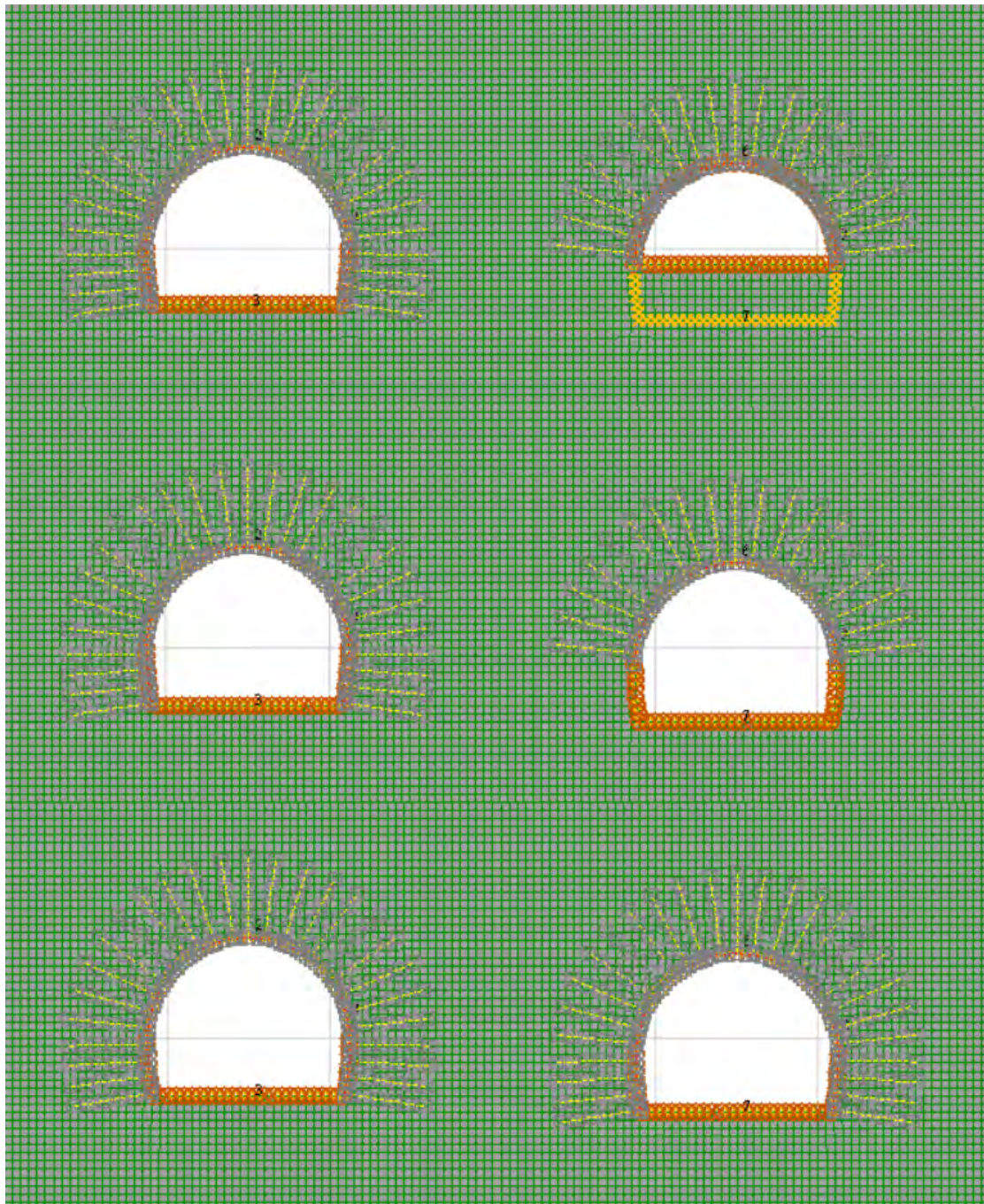
8.4 Προσομοίωση διάνοιξης δίδυμης σήραγγας

Μία παράμετρος που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στη μελέτη της παρούσας εργασίας αποτελεί η διάνοιξη δίδυμης σήραγγας. Η σήραγγα αυτή παρουσιάζει όμοια γεωμετρικά χαρακτηριστικά με την κατηγορία Α ή Β. Οι άξονες των σηράγγων είναι παράλληλοι και απέχουν μεταξύ τους 30 m, ενώ η ελάχιστη απόσταση τους είναι 17,7m ή 17,6m αντίστοιχα. Οι σήραγγες δεν βρίσκονται στο ίδιο βάθος, καθώς ο δεύτερος κλάδος βρίσκεται σε μεγαλύτερο βάθος κατά 1 μέτρο από τον πρώτο. Η νέα σήραγγα διανοίγεται και αυτή με τη Νέα Αυστριακή Μέθοδο Όρυξης Σηράγγων (NATM). Επιπλέον, τα στάδια εκσκαφής και τα μέτρα άμεσης υποστήριξης των δύο σηράγγων είναι πανομοιότυπα.

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται τα στάδια εκσκαφής και προσομοίωσης της δίδυμης σήραγγας στα προγράμματα Flac 7.0.





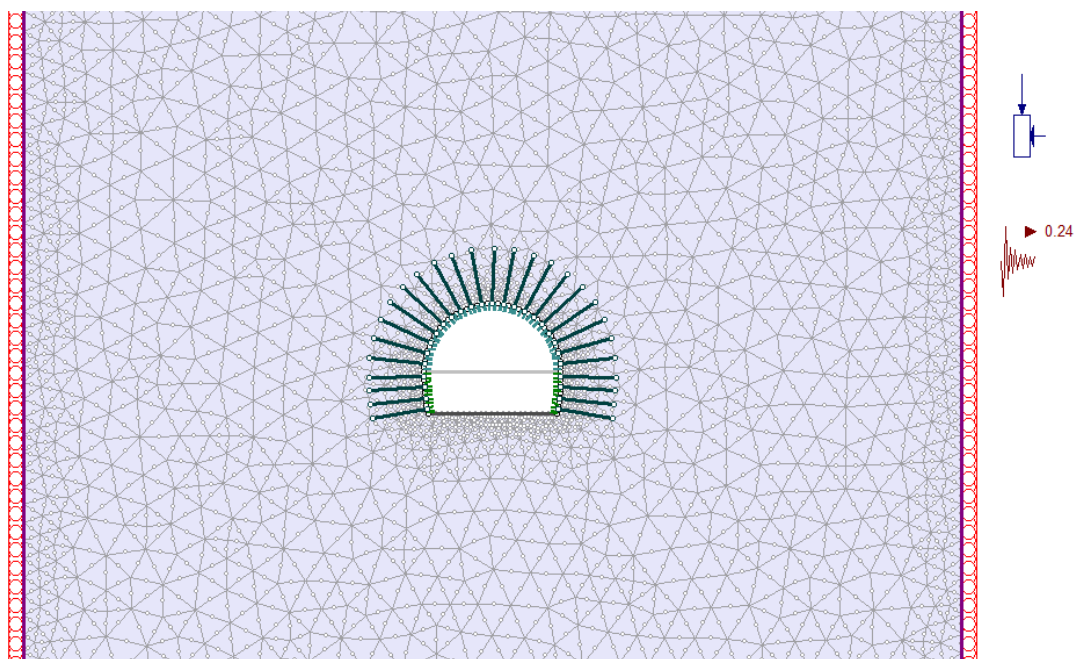


Σχήμα 8.18. Απεικόνιση σταδίων κατασκευής και προσομοίωσης δίδυμης σήραγγας με χρήση του προγράμματος Flac 7.0

8.5 Προσομοίωση με σεισμικές συνθήκες

Η προσομοίωση με σεισμικές συνθήκες πραγματοποιήθηκε με χρήση του προγράμματος Phase² 8.0 μέσω της επιλογής Seismic Loading, η οποία επιτρέπει στο χρήστη να εισάγει μία ψευδο-στατική σεισμική φόρτιση κατά την προσομοίωση διάνοιξης της σήραγγας. Πιο συγκεκριμένα, δίνεται στο χρήστη η δυνατότητα να επιλέξει το στάδιο στο οποίο θα εφαρμοσθεί η σεισμική φόρτιση και του σεισμικούς συντελεστές (seismic coefficients) για την οριζόντια και κατακόρυφη κατεύθυνση. Οι σεισμικοί συντελεστές είναι αδιάστατοι και αντιπροσωπεύουν τη (μέγιστη) επιτάχυνση του σεισμού ως συνάρτηση της επιτάχυνσης της βαρύτητας, ενώ οι τιμές του κυμαίνονται συνήθως από 0.1 έως 0.3.

Στο στάδιο αυτό της προσομοίωσης επιλέχθηκε να εφαρμοσθεί η οριζόντια συνιστώσα του σεισμού (γενικά επιτρέπεται η παράλειψη της κατακόρυφης) και η τιμή του σεισμικού συντελεστή λήφθηκε ίση με 0.24g, η οποία αντιστοιχεί σε ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας κατηγορία; II.



Σχήμα 8.19. Προσομοίωση με σεισμό

9. Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Αναλύσεων

9.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων με χρήση των προγραμμάτων Flac 7.0 και Phase² 8.0 για τις παρακάτω περιπτώσεις:

1. Διάνοιξη ανυποστήρικτης σήραγγας.
2. Διάνοιξη σήραγγας και τοποθέτηση των μέτρων άμεσης υποστήριξης.
3. Διάνοιξη δίδυμης σήραγγας.
4. Διάνοιξη σήραγγας λαμβάνοντας υπόψη τις σεισμικές συνθήκες.

Σε αυτές τις περιπτώσεις υπολογίστηκαν τα παρακάτω αποτελέσματα:

- Καμπύλες απόκρισης πετρώματος
- Κατακόρυφες Μετατοπίσεις
- Οριζόντιες Μετατοπίσεις
- Ολικές Μετατοπίσεις
- Πλαστικοποιημένες περιοχές
- Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων
- Αξονικές δυνάμεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος
- Καμπτικές ροπές στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

9.2 Αποτελέσματα ανάλυσης ανυποστήρικτης σήραγγας

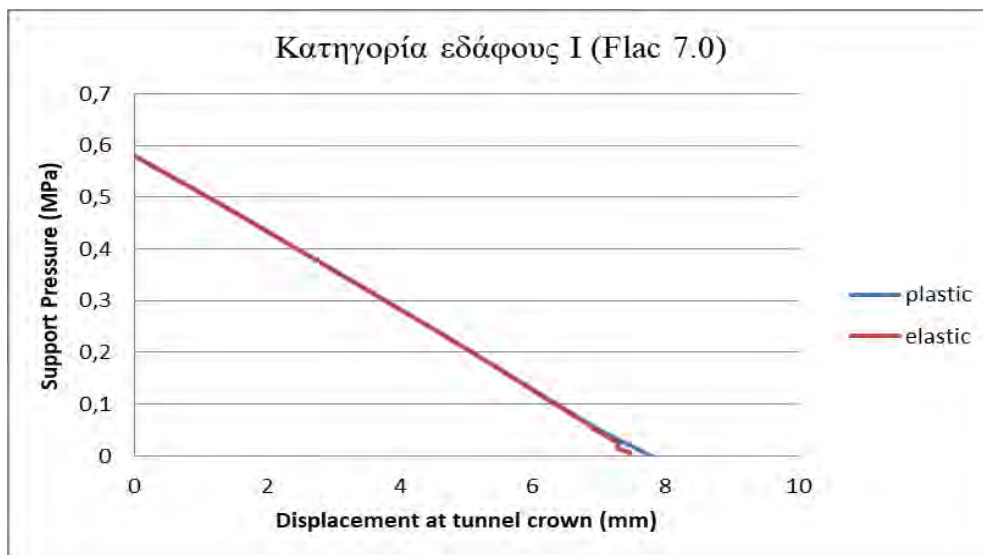
Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται οι ολικές μετατοπίσεις στην οροφή της σήραγγας για τις κατηγορίες εδάφους I και II, όπως επίσης και για τον συνδυασμό διαφόρων εδαφικών σχηματισμών. Τα αποτελέσματα προέκυψαν για ελαστική και ελαστοπλαστική συμπεριφορά της βραχόμαζας.

Στα σχήματα φαίνονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες αντίδρασης πετρώματος, όπως προέκυψαν αντιστοιχίζοντας τις συγκλίσεις που παρατηρήθηκαν σε κάθε στάδιο αποτόνωσης με τις αντίστοιχες εσωτερικές πιέσεις.

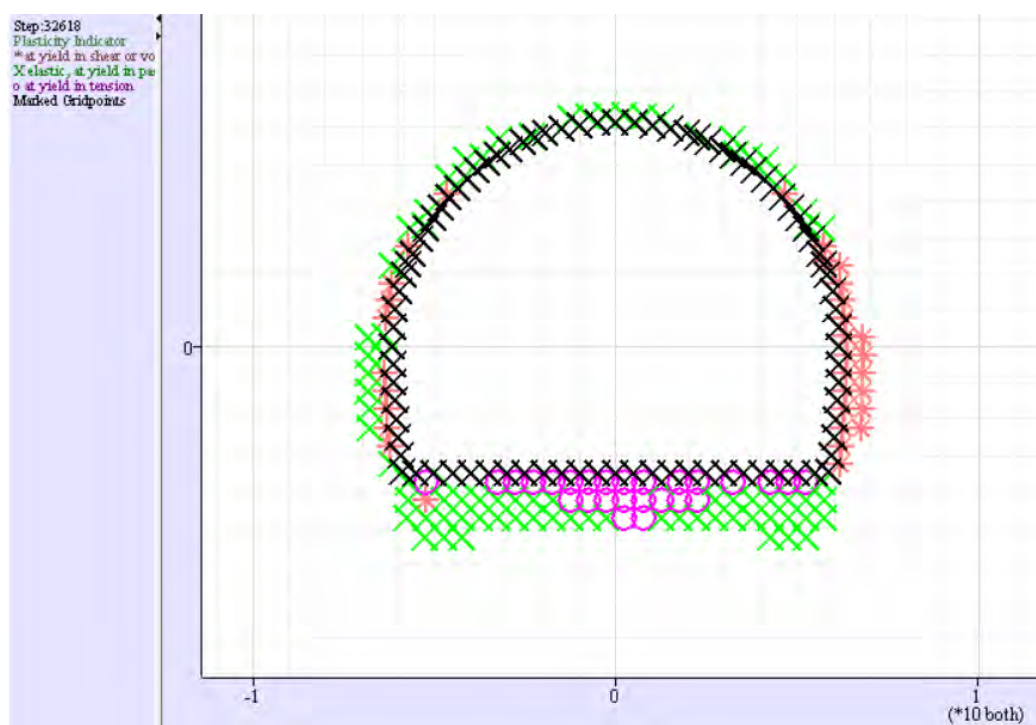
9.2.1 Αποτελέσματα με χρήση του προγράμματος Flac 7.0

➤ Κατηγορία εδάφους I

Κατηγορία εδάφους I (Flac 7.0)		
Support Pressure (MPa)	Displacement at tunnel crown (mm)	
	elastic	plastic
0,58	0	0
0,47	1,52	1,52
0,24	4,58	4,58
0,12	6,11	6,11
0,059	6,86	6,89
0,055	6,88	6,93
0,027	7,26	7,36
0,014	7,29	7,57
0,0069	7,46	7,68
0	7,46	7,79



Σχήμα 9.1. Καμπύλη αντίδρασης βραχόμαζας κατηγορία εδάφους I



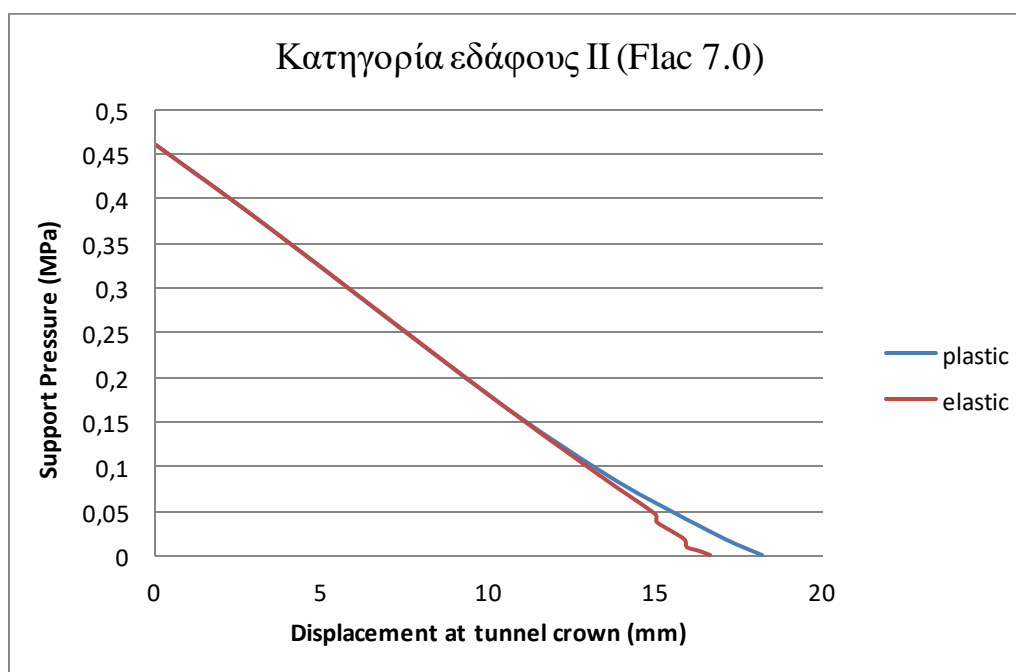
Σχήμα 9.2. Ζώνη πλαστικοποίησης για την κατηγορία I

Plasticity Indicator
 * at yield in shear or vol.
 X elastic, at yield in past
 o at yield in tension

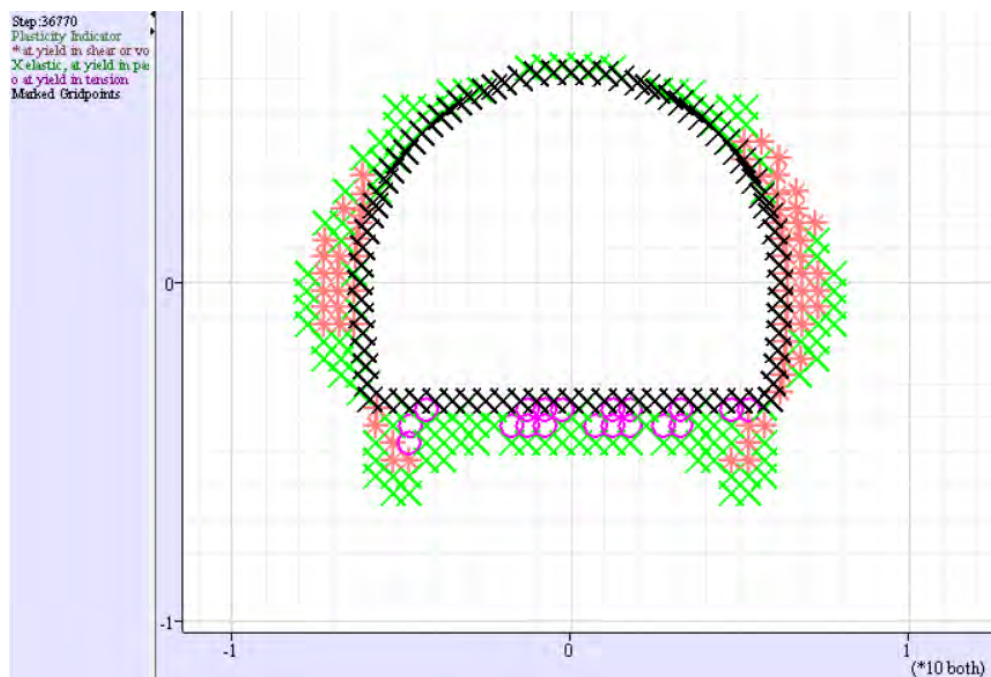
Σχήμα 9.3. Δείκτες πλαστικοποίησης στο Flac 7.0. Τα σύμβολα υποδεικνύουν διαρροή σε διάτμηση στο συγκεκριμένο στάδιο, διαρροή σε διάτμηση ή εφελκυσμο στο παρελθόν και τα στοιχεία έχουν επιστρέψει στην ελαστική περιοχή, διαρροή σε εφελκυσμό στο συγκεκριμένο στάδιο αντίστοιχα.

➤ **Κατηγορία εδάφους II**

Κατηγορία εδάφους II (FLAC)		
Support Pressure (MPa)	Displacement at tunnel crown (mm)	
	elastic	plastic
0,46	0	0
0,37	3,3	3,3
0,18	9,98	9,98
0,09	13,3	13,54
0,046	14,99	15,64
0,037	15,04	16,1
0,018	15,86	17,09
0,009	15,94	17,63
0,0046	16,31	17,91
0	16,64	18,21



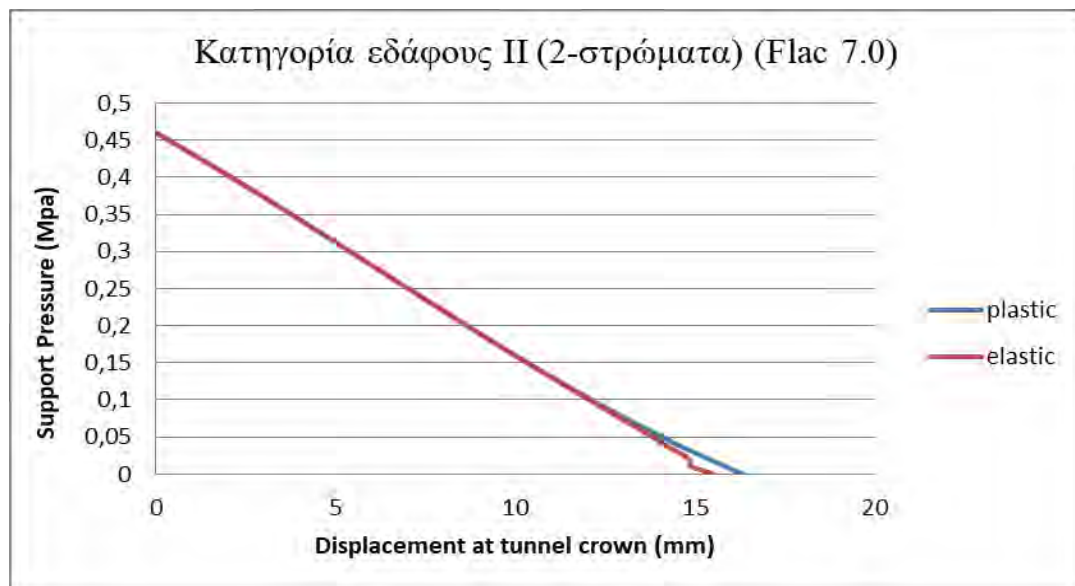
Σχήμα 9.4. Καμπύλη αντίδρασης βραχόμαζας κατηγορία εδάφους II



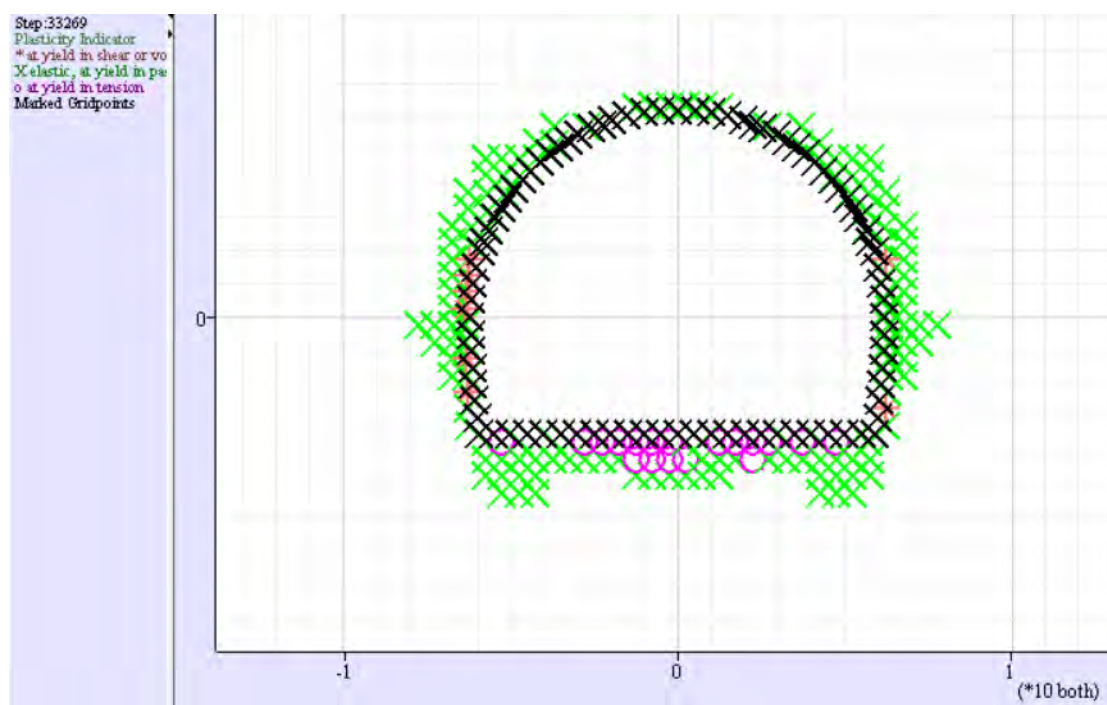
Σχήμα 9.5. Ζώνη πλαστικοποίησης για την κατηγορία II

➤ **Κατηγορία εδάφους II (2- στρώματα)**

Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα) (FLAC)		
Support Pressure (Mpa)	Displacement at tunnel crown (mm)	
	elastic	plastic
0,46	0	0
0,37	3,1	3,1
0,18	9,31	9,31
0,09	12,41	12,5
0,046	13,96	14,25
0,043	14,02	14,34
0,022	14,78	15,3
0,011	14,87	15,81
0,005	15,2	16,07
0	15,51	16,36



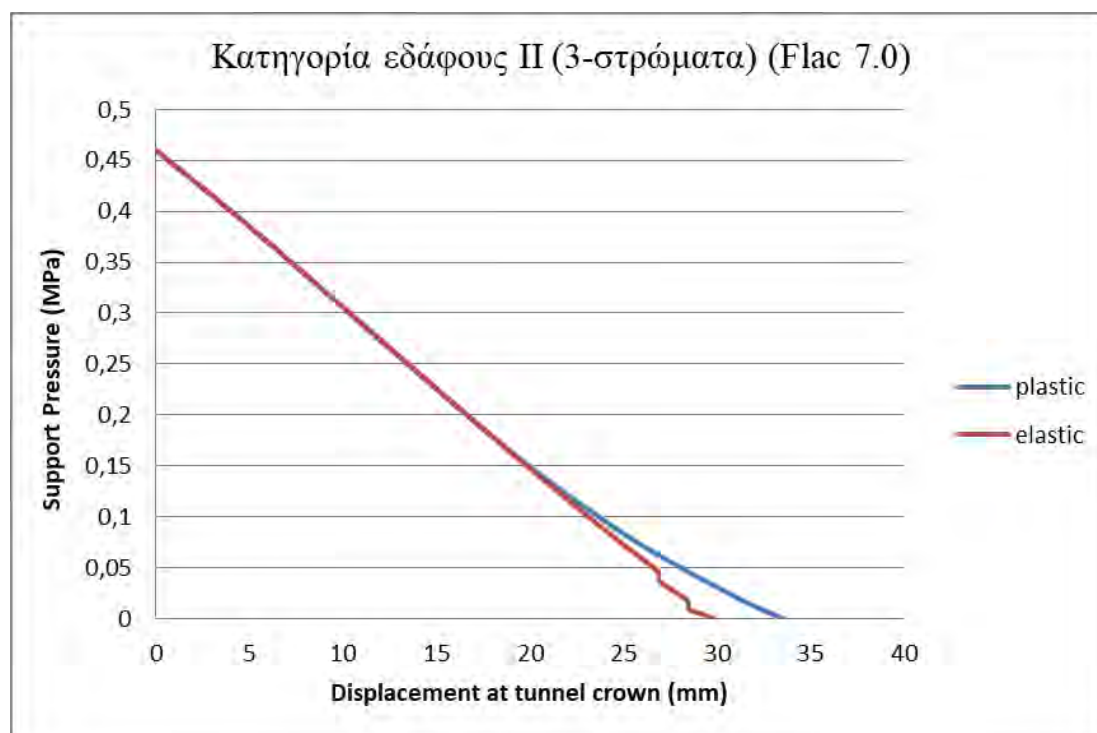
Σχήμα 9.6. Καμπύλη αντίδρασης βραχόμαζας κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα)



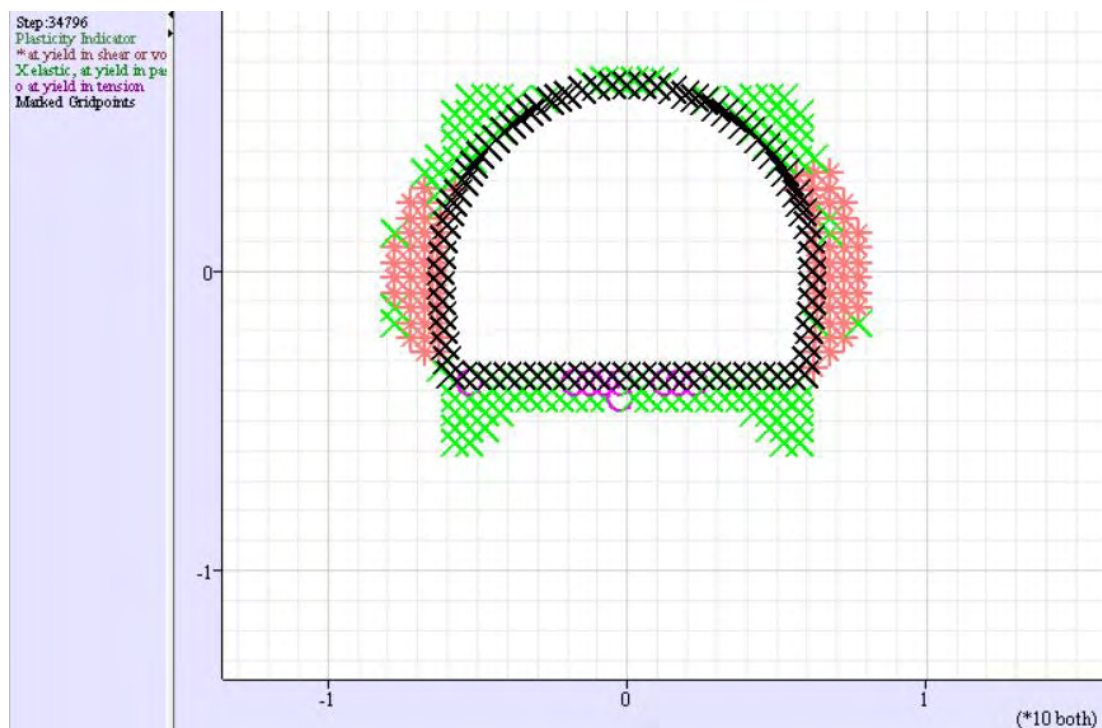
Σχήμα 9.7: Ζώνη πλαστικοποίησης για την κατηγορία II (2- στρώματα)

➤ **Κατηγορία εδάφους II (3- στρώματα)**

Κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα) (Flac 7.0)		
Support pressure (MPa)	Displacement at tunnel crown (mm)	
	elastic	plastic
0,46	0	0
0,37	5,96	5,96
0,18	17,9	17,9
0,09	23,8	24,46
0,046	26,83	28,46
0,037	26,9	29,36
0,018	28,39	31,34
0,009	28,5	32,4
0,0045	29,2	32,95
0	29,8	33,56



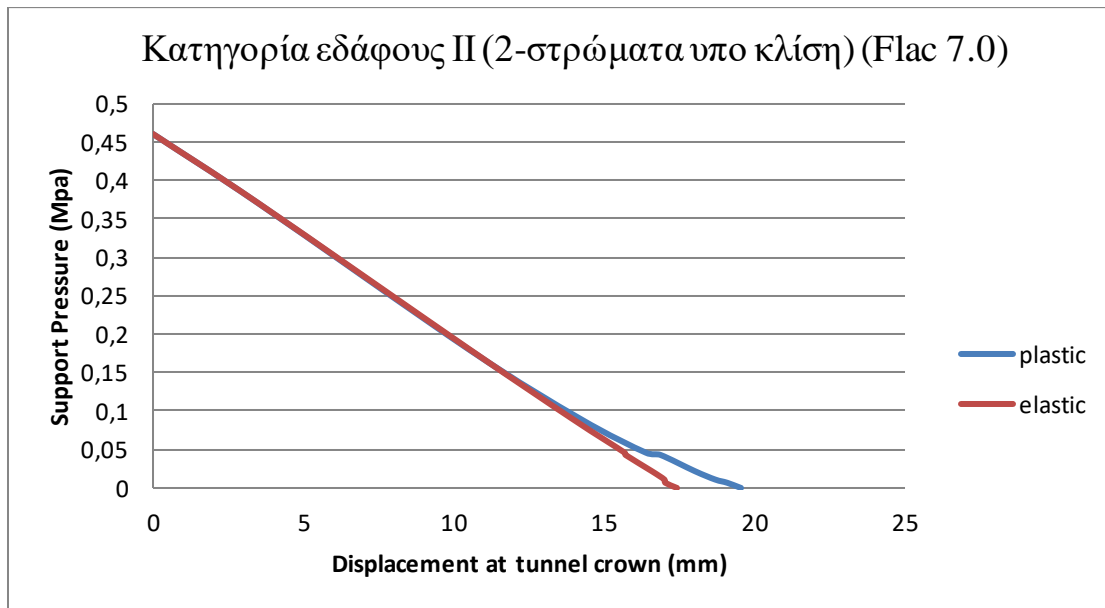
Σχήμα 9.8. Καμπύλη αντίδρασης βραχώμαζας κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα)



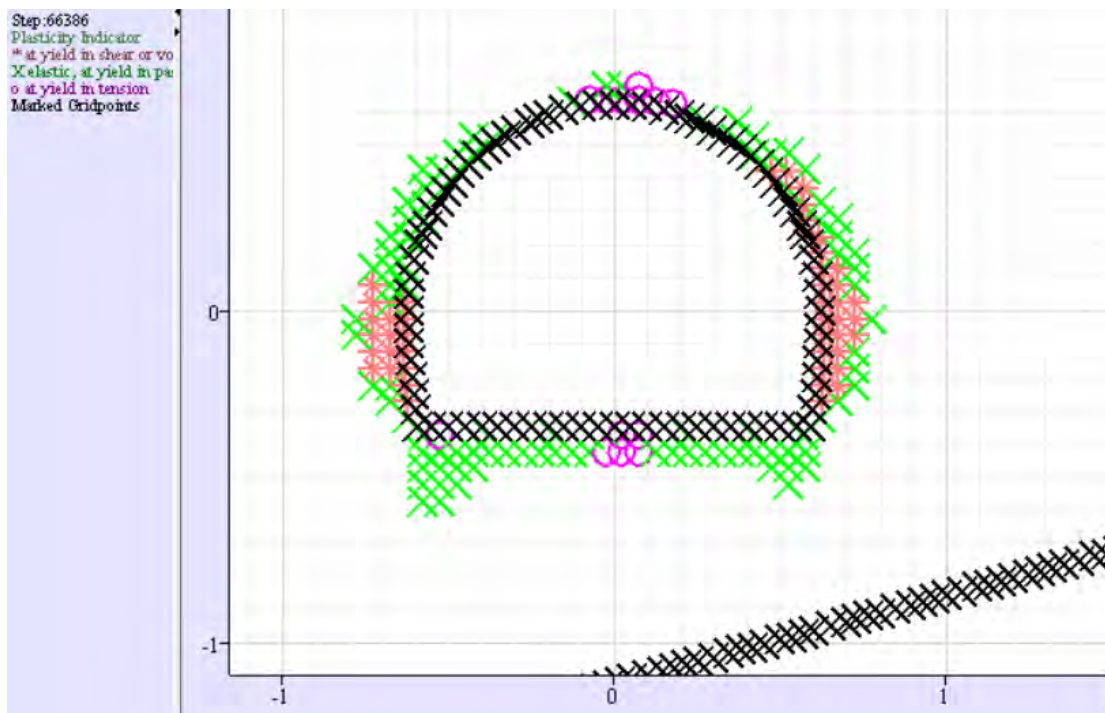
Σχήμα 9.9: Ζώνη πλαστικοποίησης για την κατηγορία II (3- στρώματα)

➤ **Κατηγορία εδάφους II (2- στρώματα υπο κλίση)**

Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα υπο κλίση) (Flac 7.0)		
Support pressure (MPa)	Displacement at tunnel crown (mm)	
	elastic	plastic
0,46	0	0
0,37	3,5	3,5
0,18	10,51	10,51
0,09	13,91	14,21
0,046	15,65	16,39
0,043	15,68	16,88
0,022	16,55	18,02
0,011	16,97	18,7
0,0068	17	19,1
0	17,39	19,56



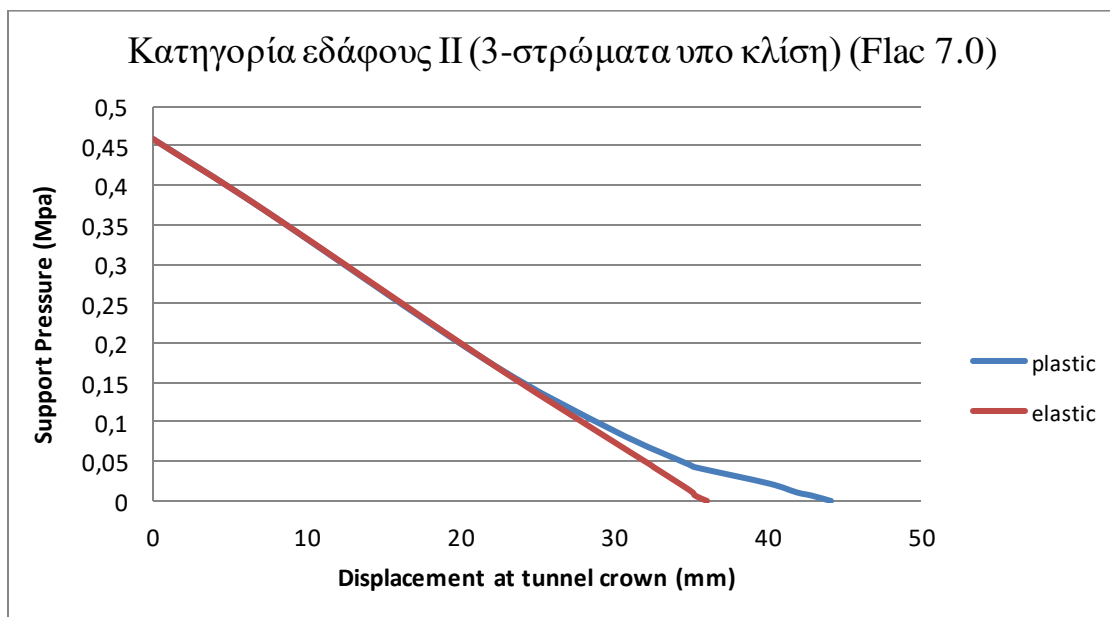
Σχήμα 9.10. Καμπύλη αντίδρασης βραχόμαζας κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα υπο κλίση)



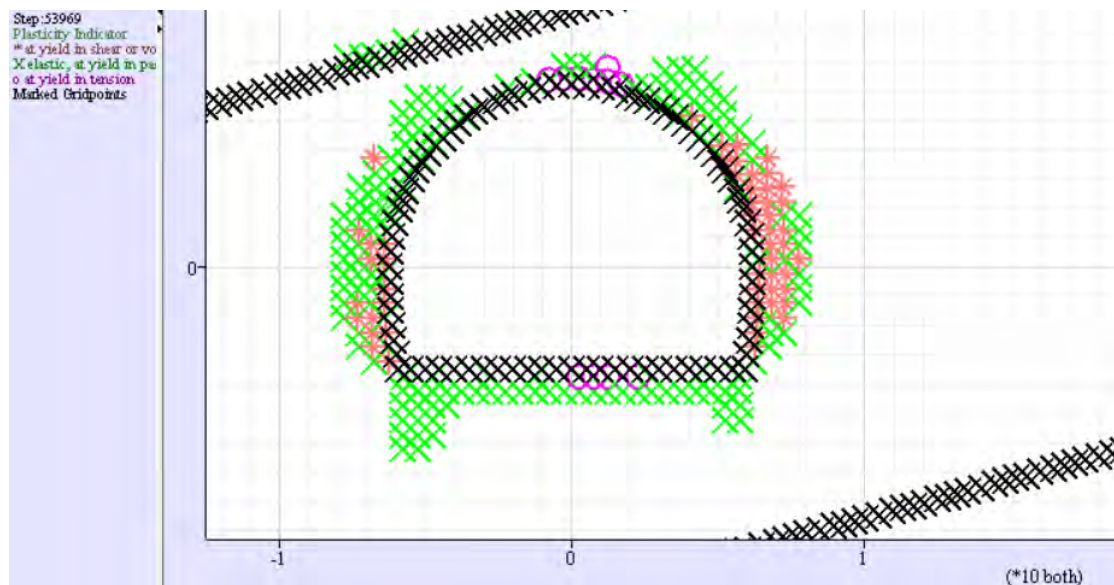
Σχήμα 9.11. Ζώνη πλαστικοποίησης για την κατηγορία εδάφους II (2- στρώματα υπο κλίση)

➤ **Κατηγορία εδάφους II (3- στρώματα υπο κλίση)**

Κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα υπο κλίση) (Flac 7.0)		
Support pressure (MPa)	Displacement at tunnel crown (mm)	
	elastic	plastic
0,46	0	0
0,37	7,21	7,21
0,18	21,56	21,56
0,09	28,73	29,9
0,046	32,32	34,89
0,037	32,53	37,22
0,018	34,21	40,09
0,009	35,05	41,84
0,0046	35,22	42,84
0	35,99	44,08



Σχήμα 9.12. Καμπύλη αντίδρασης βραχόμαζας για την κατηγορία εδάφους II (2- στρώματα υπο κλίση)



Σχήμα 9.13. Ζώνη πλαστικοποίησης για την κατηγορία εδάφους II (3- στρώματα υπο κλίση)

Πίνακας 9.1. Ολικές μετατοπίσεις για όλες τις κατηγορίες

Flac 7.0	u_y (mm) οροφή	u_y (mm) δάπεδο	u_y (mm) τοιχώματα	u_x (mm) τοιχώματα
Κατηγορία εδάφους I	-7,24	9,18	-1,02	1,13
Κατηγορία εδάφους II	-15,15	20,35	-3,54	2,16
Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα)	-13,18	7,36	-1,73	1,31
Κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα)	-26,76	23,09	-9,33	3,27
Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα υπο κλίση)	-15,87	14,79	-5,57	2,72
Κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα υπο κλίση)	-31,66	20,08	-12,7	4,07

Σημειώνεται ότι το αρνητικό πρόσημο στη μετατόπιση της οροφής δηλώνει μετακίνηση με κατεύθυνση προς τα κάτω (καθίζηση οροφής), ενώ στο δάπεδο η μετακίνηση έχει κατεύθυνση προς τα πάνω (ανύψωση δαπέδου).

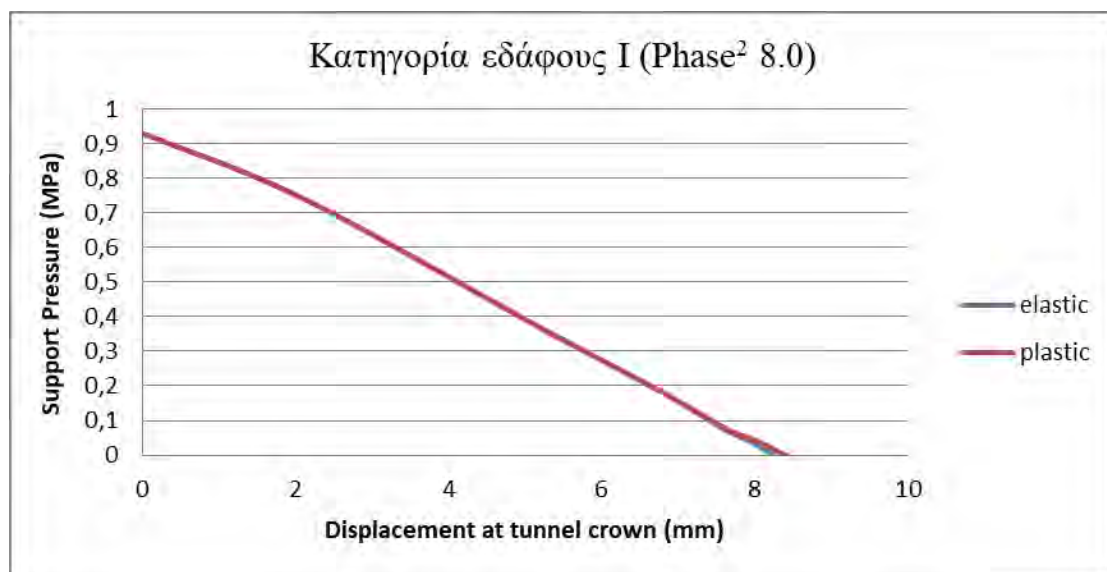
Πίνακας 9.2. Κρίσιμη πίεση και ακτίνα πλαστικοποίησης για όλες τις κατηγορίες

(Flac 7.0)	P_{cr} (MPa)	r_p (m) οροφή	r_p (m) τοιχώματα
Κατηγορία εδάφους I	0,08	0,21	0,67
Κατηγορία εδάφους II	0,14	0,2	1,6
Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα)	0,15	0,15	1,55
Κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα)	0,16	0,15	1,7
Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα υπο κλίση)	0,15	0,55	1,55
Κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα υπο κλίση)	0,16	0,65	1,6

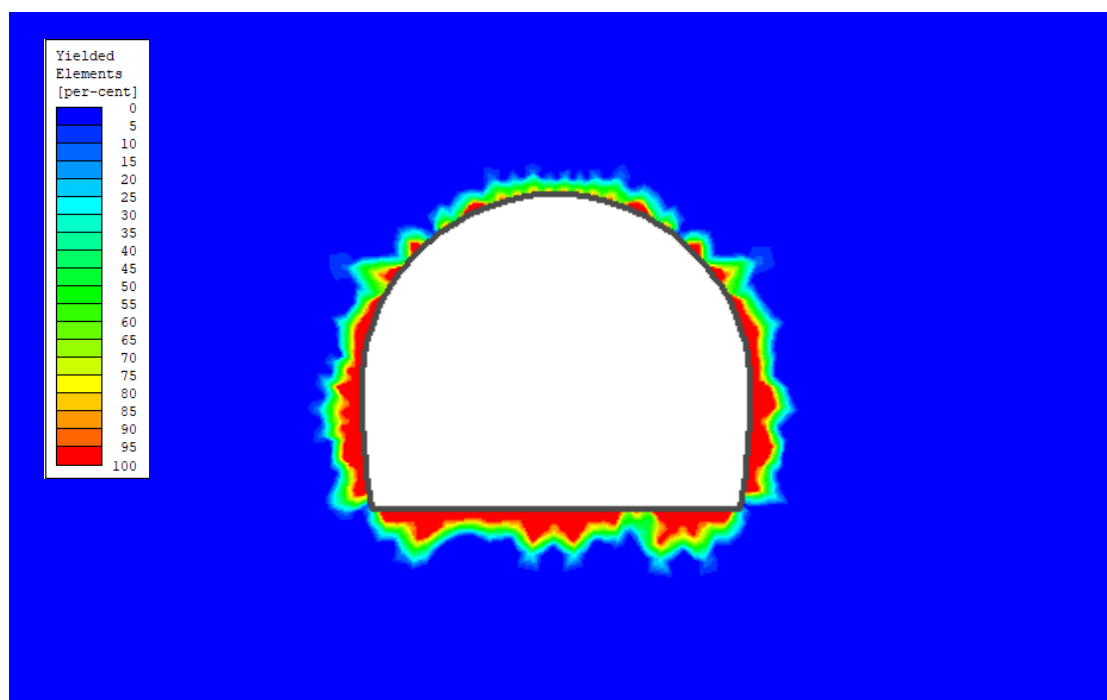
9.2.2 Αποτελέσματα με χρήση του προγράμματος Phase 8.0

➤ Κατηγορία εδάφους I

Κατηγορία εδάφους I (Phase ² 8.0)		
Support pressure (MPa)	Displacement at tunnel crown (mm)	
	elastic	plastic
0,93	0	0
0,74	2,11	2,11
0,37	5,18	5,18
0,19	6,72	6,72
0,09	7,49	7,52
0,07	7,64	7,68
0,04	7,95	8,04
0,02	8,1	8,23
0,009	8,18	8,32
0	8,25	8,42



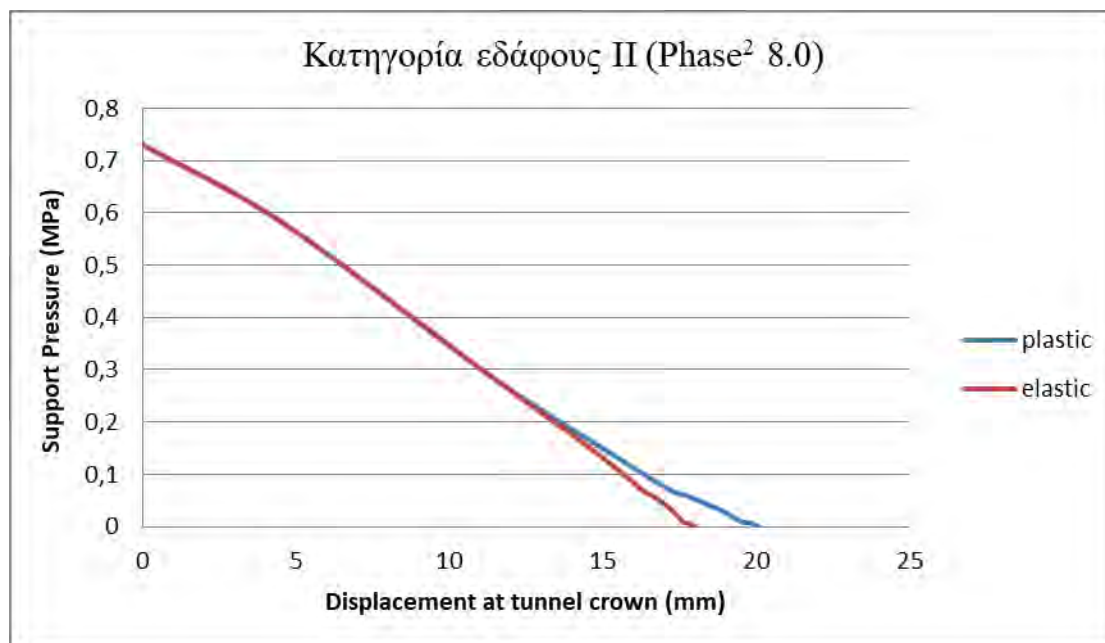
Σχήμα 9.14. Καμπύλη αντίδρασης βραχόμαζας κατηγορία εδάφους I



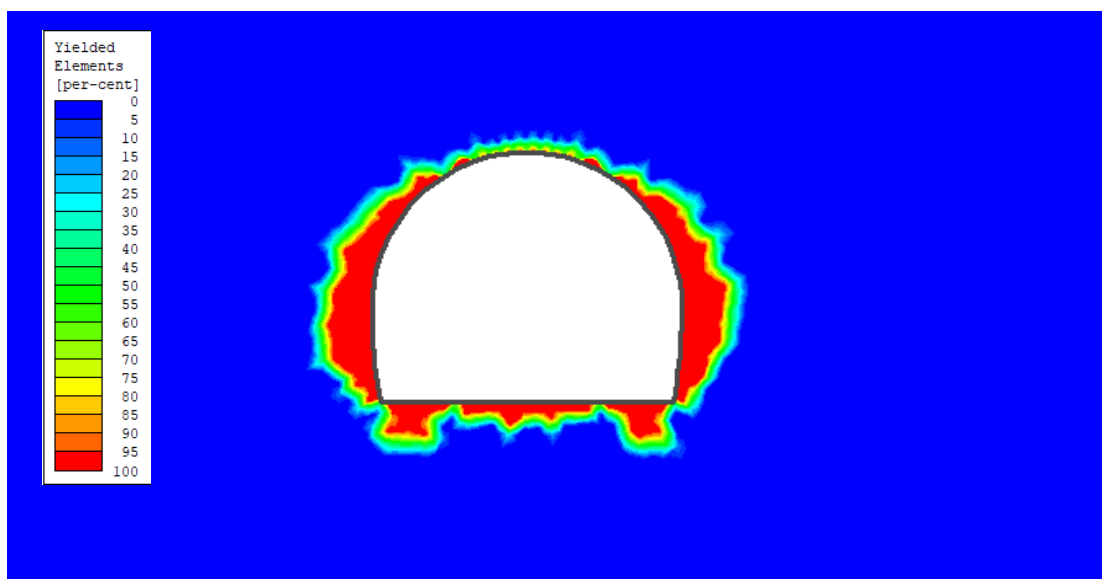
Σχήμα 9.15: Ζώνη πλαστικοποίησης για την κατηγορία εδάφους I

➤ **Κατηγορία εδάφους II**

Κατηγορία εδάφους II (Phase ² 8.0)		
Support Pressure (MPa)	Displacement at tunnel crown (mm)	
	elastic	plastic
0,73	0	0
0,58	4,59	4,59
0,29	11,3	11,3
0,15	14,6	15
0,07	16,3	17,2
0,06	16,6	17,7
0,03	17,3	18,9
0,01	17,6	19,5
0,007	17,8	19,8
0	18	20,1



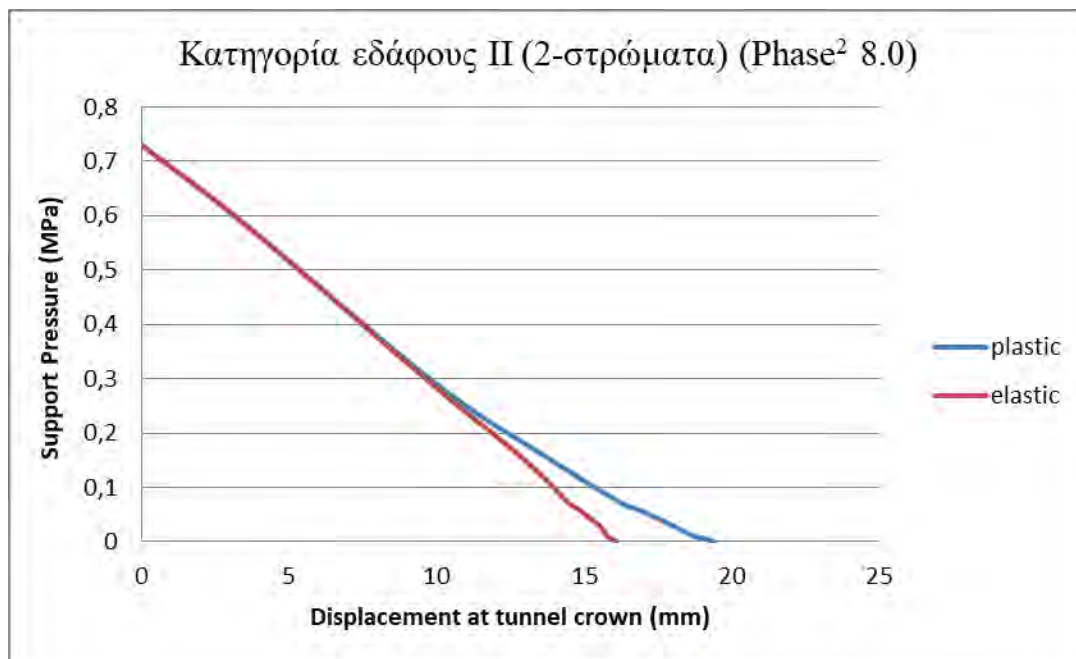
Σχήμα 9.16. Καμπύλη αντίδρασης βραχώμαζας κατηγορία εδάφους II



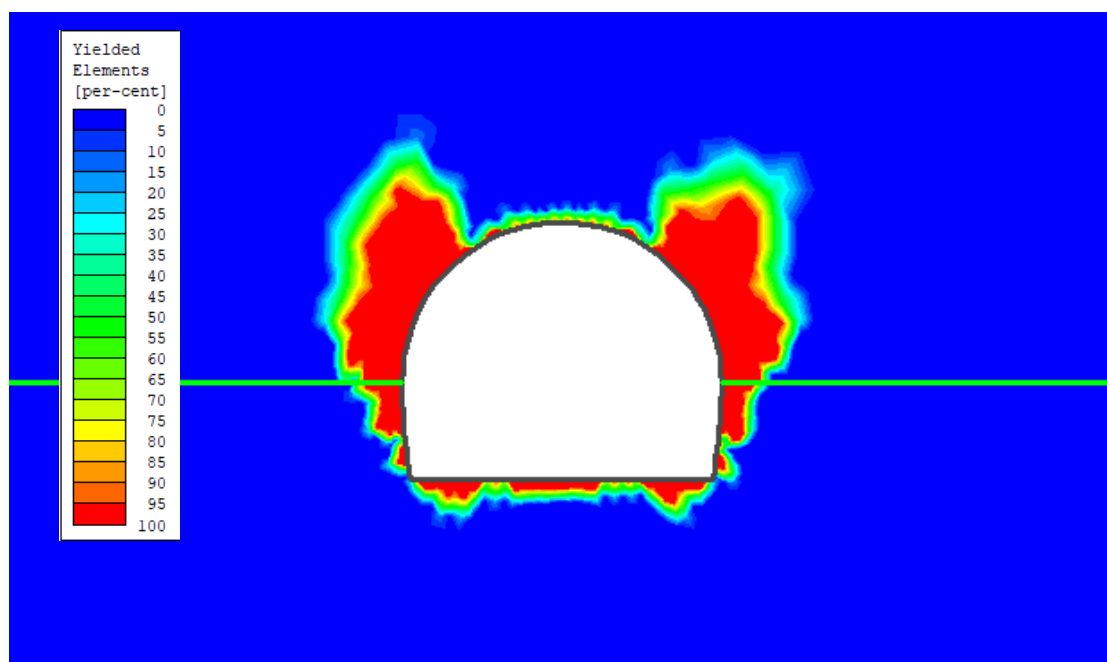
Σχήμα 9.17: Ζώνη πλαστικοποίησης για την κατηγορία εδάφους II

➤ **Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα)**

Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα) (Phase ² 8.0)		
Support Pressure (MPa)	Displacement at tunnel crown (mm)	
	elastic	plastic
0,73	0	0
0,58	3,6	3,6
0,29	9,85	10
0,15	13	13,9
0,07	14,5	16,3
0,06	14,8	16,8
0,03	15,5	18
0,01	15,8	18,7
0,007	15,9	19
0	16,1	19,4



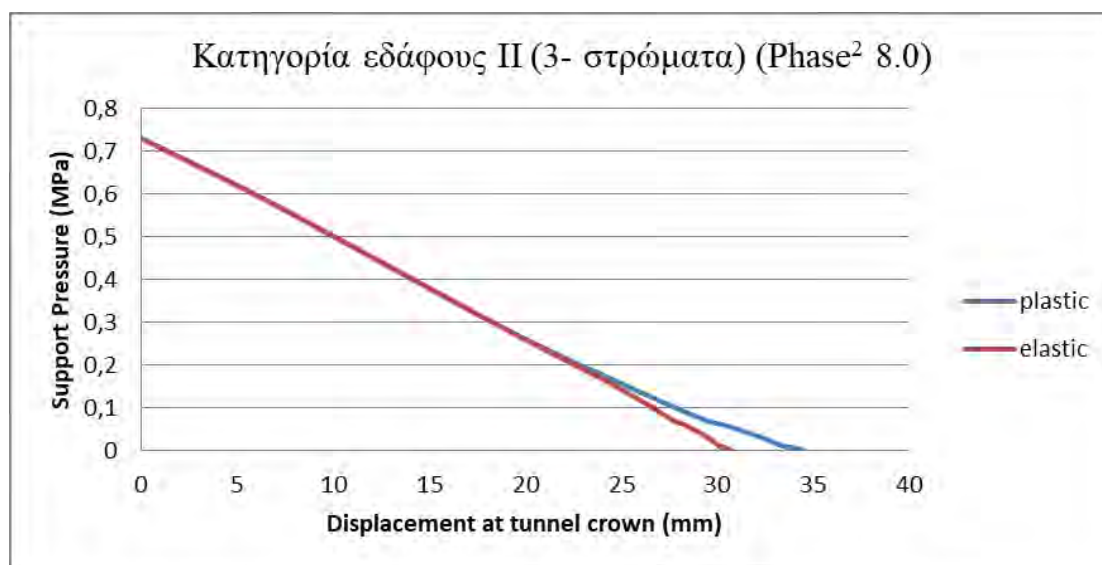
Σχήμα 9.18. Καμπύλη αντίδρασης βραχώμαζας κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα)



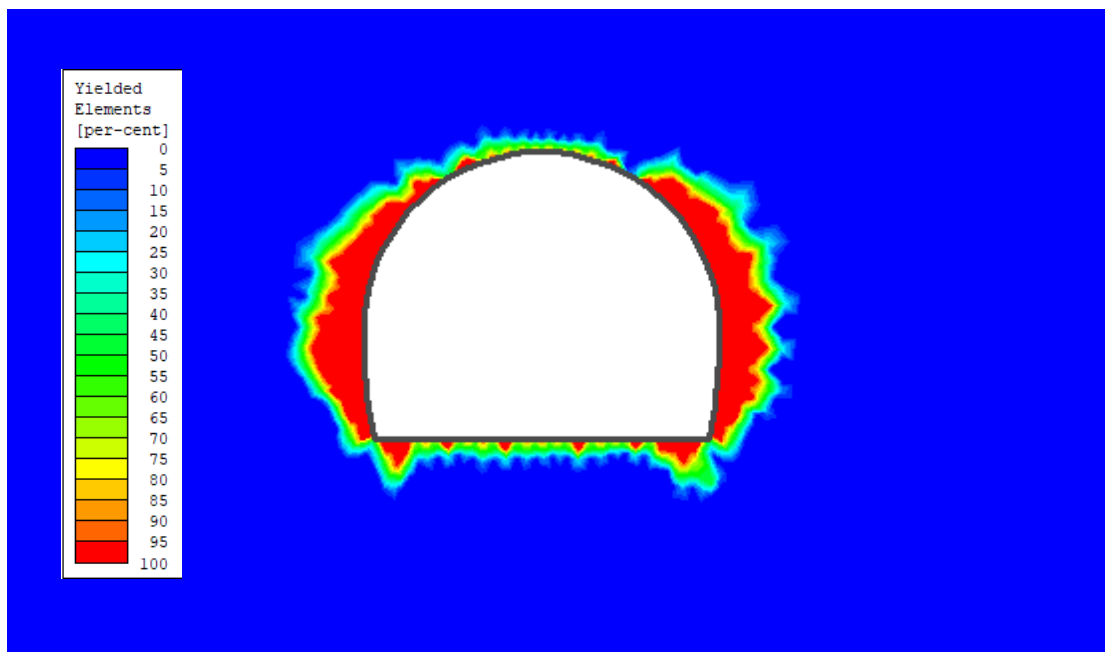
Σχήμα 9.19: Ζώνη πλαστικοποίησης για την κατηγορία εδάφους II (2- στρώματα)

➤ **Κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα)**

Κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα) (Phase ² 8.0)		
Support Pressure (MPa)	Displacement at tunnel crown (mm)	
	elastic	plastic
0,73	0	0
0,58	6,71	6,71
0,29	18,7	18,7
0,15	24,7	25,3
0,07	27,7	29,4
0,06	28,3	30,3
0,03	29,5	32,3
0,01	30,1	33,4
0,00726	30,4	33,9
0	30,7	34,5



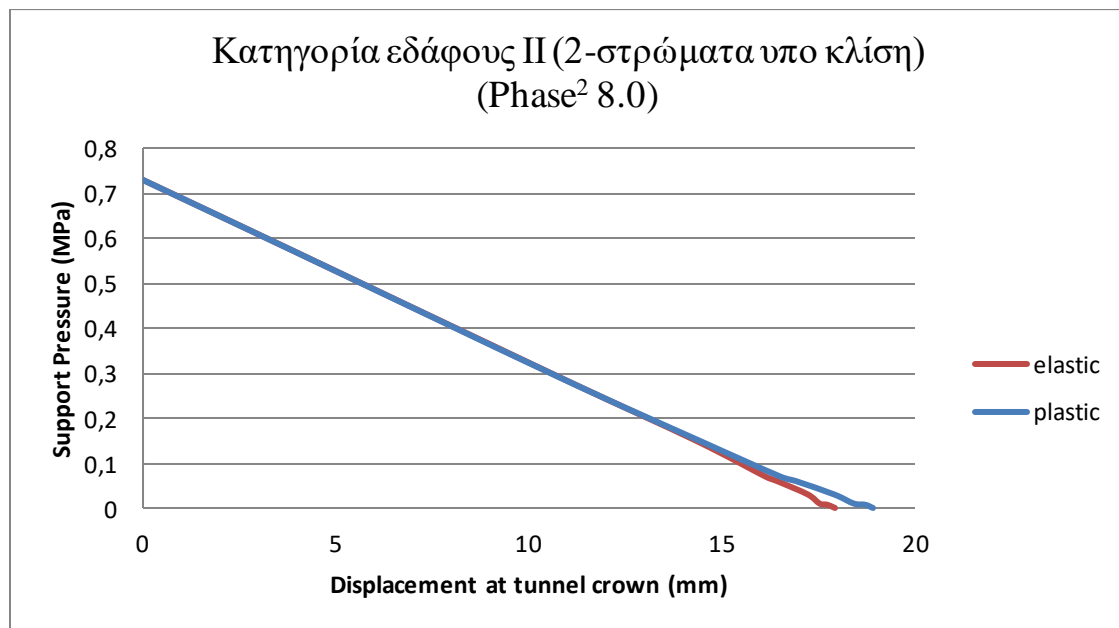
Σχήμα 9.20. Καμπύλη αντίδρασης βραχόμαζας κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα)



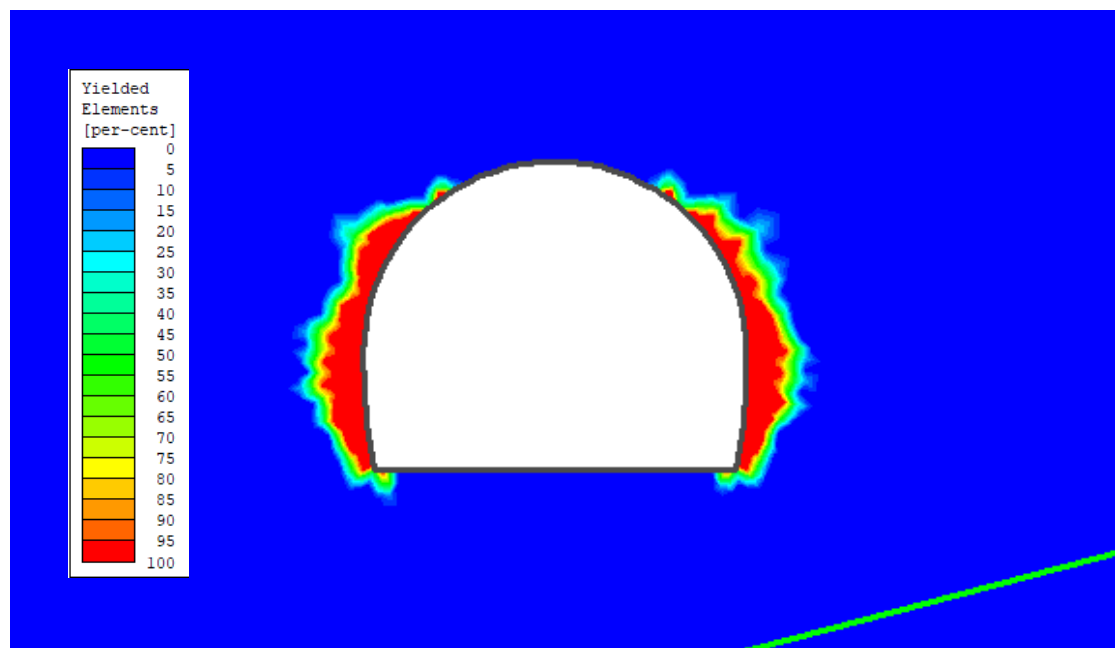
Σχήμα 9.21: Ζώνη πλαστικοποίησης για την κατηγορία εδάφους II (3- στρώματα)

➤ **Κατηγορία εδάφους II (2- στρώματα υπό κλίση)**

Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα υπό κλίση) (Phase ² 8.0)		
Support Pressure (MPa)	Displacement at tunnel crown (mm)	
	elastic	plastic
0,73	0	0
0,58	3,7	3,7
0,29	10,8	10,8
0,15	14,3	14,4
0,07	16,1	16,5
0,06	16,4	16,9
0,03	17,2	17,9
0,01	17,5	18,4
0,00726	17,7	18,7
0	17,9	18,9



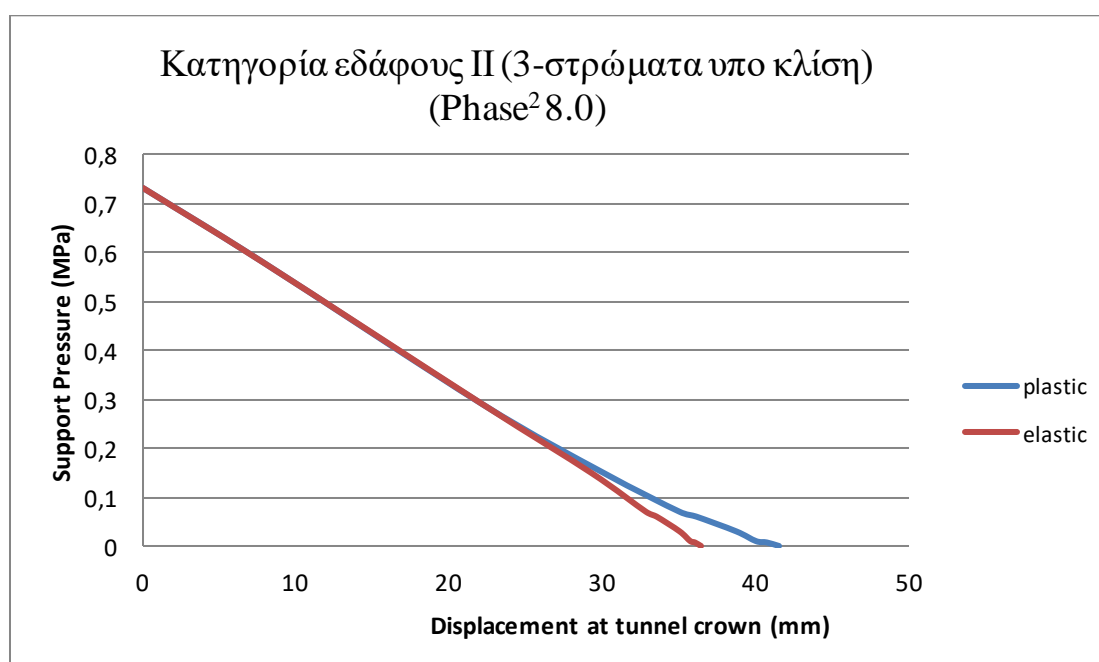
Σχήμα 9.22. Καμπύλη αντίδρασης βραχόμαζας κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα υπο κλίση)



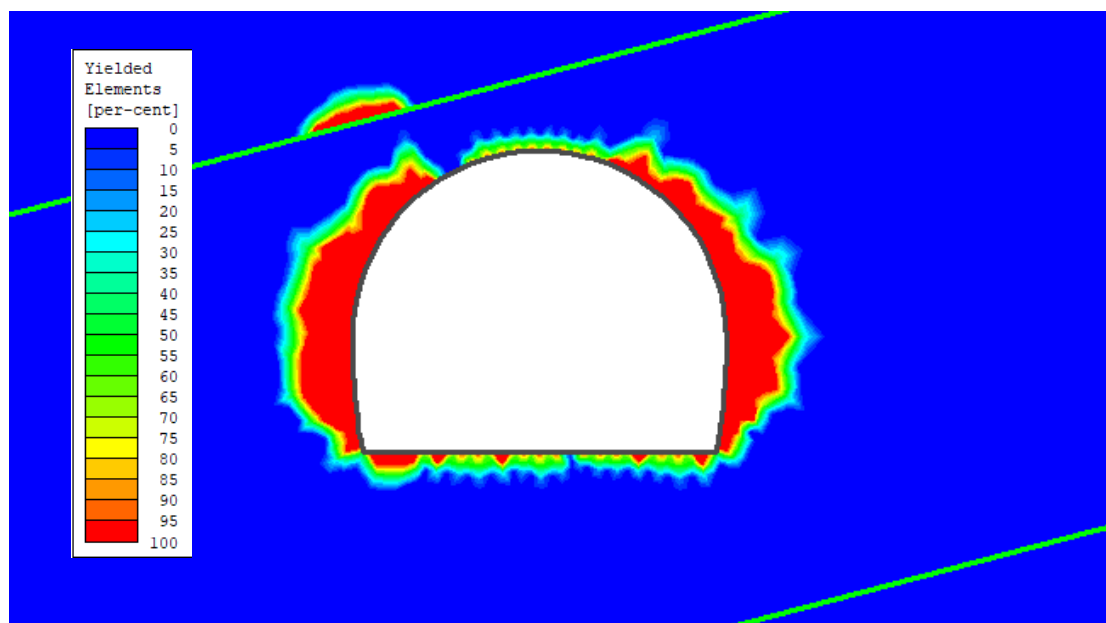
Σχήμα 9.23. Ζώνη πλαστικοποίησης για την κατηγορία εδάφους II (2- στρώματα υπο κλίση)

➤ Κατηγορία εδάφους II (3- στρώματα υπο κλίση)

Κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα υπό κλίση) (Phase ² 8.0)		
Support Pressure (MPa)	Displacement at tunnel crown (mm)	
	elastic	plastic
0,73	0	0
0,58	7,75	7,76
0,29	22,1	22,1
0,15	29,2	30
0,07	32,8	35
0,06	33,5	36,1
0,03	35	38,7
0,01	35,7	40
0,00726	36	40,7
0	36,4	41,5



Σχήμα 9.24. Καμπύλη αντίδρασης βραχόμαζας κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα υπο κλίση)



Σχήμα 9.25: Ζώνη πλαστικοποίησης για την κατηγορία εδάφους II (3- στρώματα υπο κλίση)

Πίνακας 9.3. Ολικές μετατοπίσεις για όλες τις κατηγορίες

Phase ² 8.0	u_y (mm) οροφή	u_y (mm) δάπεδο	u_x (mm) τοιχώματα
Κατηγορία εδάφους I	8,42	7,21	2,6
Κατηγορία εδάφους II	20,1	16,6	8,1
Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα)	19,4	5,92	3,67
Κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα)	34,5	18,8	13,6
Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα υπο κλίση)	18,9	9,05	8,21
Κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα υπο κλίση)	41,5	16	15,6

Πίνακας 9.4. Κρίσιμη πίεση και ακτίνα πλαστικοποίησης για όλες τις κατηγορίες

Phase ² 8.0	P _{cr} (MPa)	r _p (m) οροφή	r _p (m) τοιχώματα
Κατηγορία εδάφους I	0,12	0	0,8
Κατηγορία εδάφους II	0,26	0	2
Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα)	0,37	0	1,6
Κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα)	0,25	0	1,5
Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα υπο κλίση)	0,16	0	1,4
Κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα υπο κλίση)	0,27	0,2	2,3

9.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης σήραγγας με τοποθέτηση των μέτρων άμεσης υποστήριξης

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όπως προέκυψαν από την προσομοίωση διάνοιξης σήραγγας με τοποθέτηση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης:

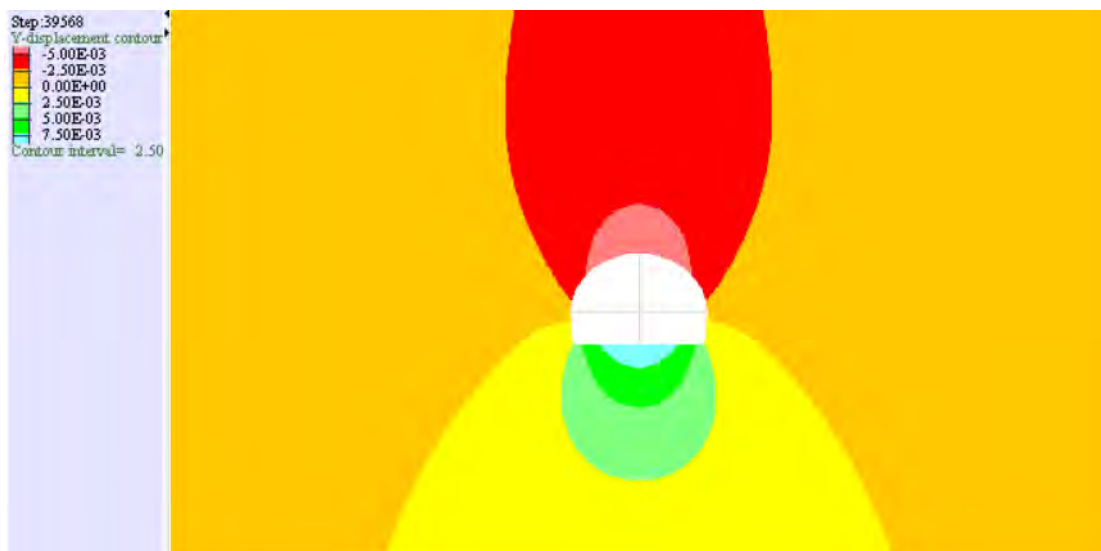
9.3.1 Αποτελέσματα με χρήση του προγράμματος Flac 7.0

Κατακόρυφες Μετατοπίσεις

Παρακάτω παρουσιάζονται οι κατακόρυφες συγκλίσεις όπως προέκυψαν για κάθε κατηγορία εδάφους. Οι μετατοπίσεις μετρήθηκαν στην οροφή, στο δάπεδο και στις παρειές της κατασκευής.

➤ Κατηγορία εδάφους I

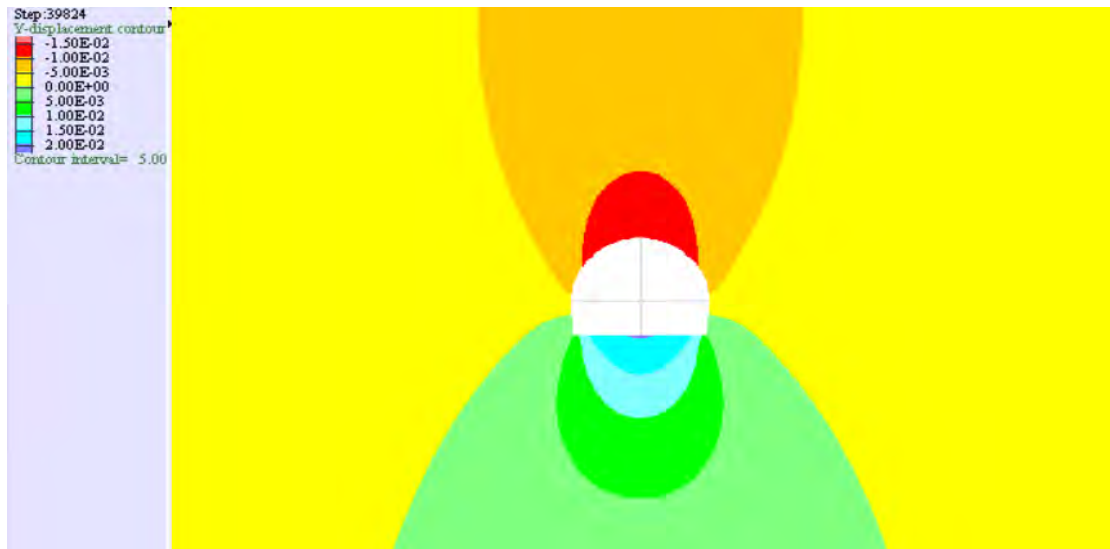
- Οροφή -7.238 mm
- Δάπεδο 9.183 mm
- Τοιχώματα -1.019 mm



Σχήμα 9.26. Κατακόρυφες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους I)

➤ **Κατηγορία εδάφους II**

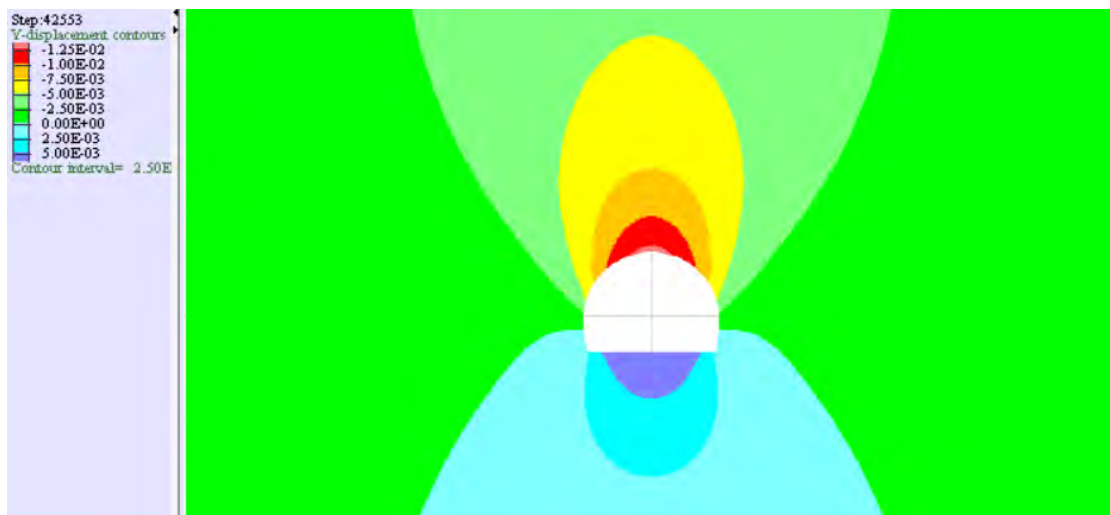
- Οροφή -15.15 mm
- Δάπεδο 20.35 mm
- Τοιχώματα -3.54 mm



Σχήμα 9.27. Κατακόρυφες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II)

➤ **Κατηγορία εδάφους II (2- στρώματα)**

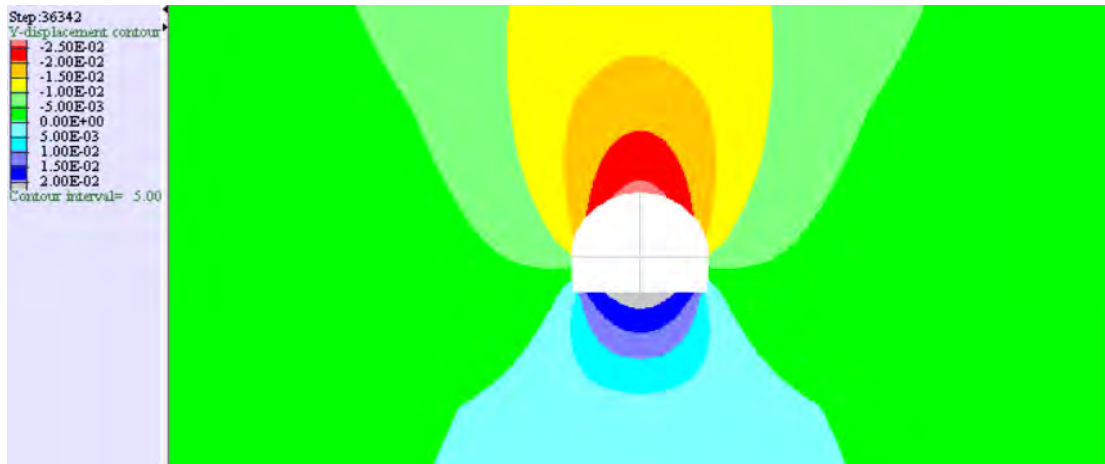
- Οροφή -13.18 mm
- Δάπεδο 7.359 mm
- Τοιχώματα -1.728 mm



Σχήμα 9.28. Κατακόρυφες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II(2-στρώματα)

➤ **Κατηγορία εδάφους II (3- στρώματα)**

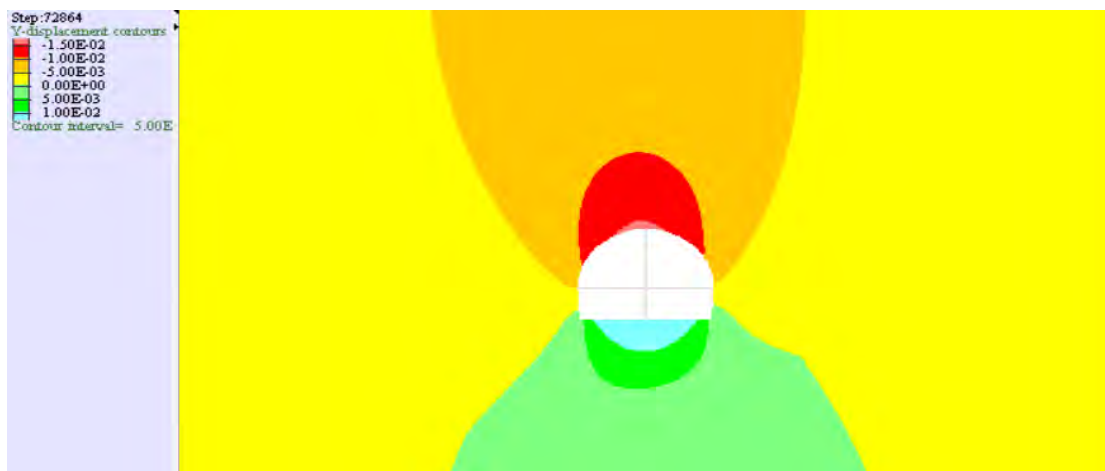
- Οροφή -26.76 mm
- Δάπεδο 23.09 mm
- Τοιχώματα -9.327 mm



Σχήμα 9.29. Κατακόρυφες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II(3-στρώματα)

➤ **Κατηγορία εδάφους II (2- στρώματα υπό κλίση)**

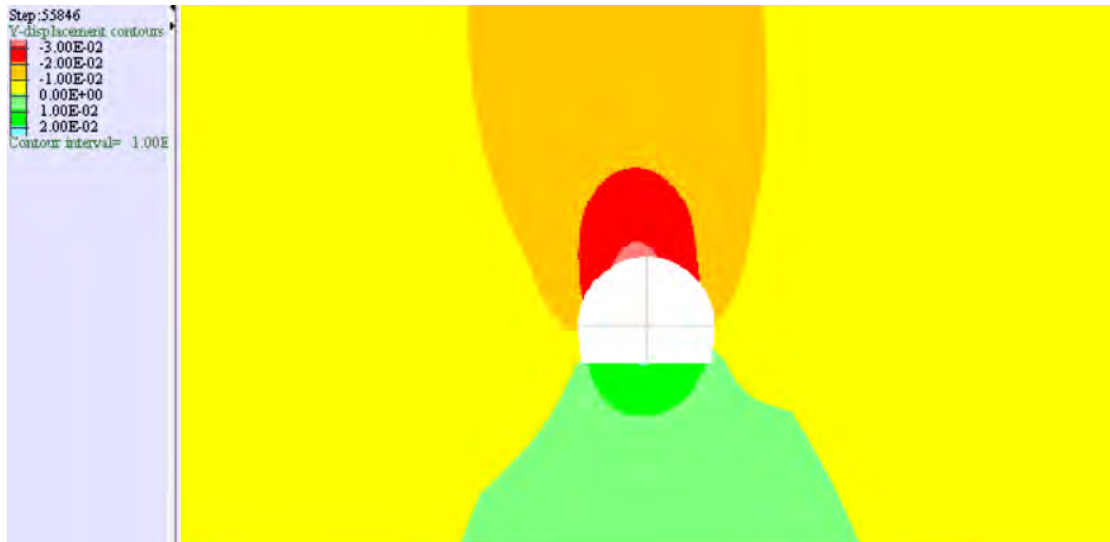
- Οροφή -15.87 mm
- Δάπεδο 14.79 mm
- Τοιχώματα -5.57 mm



Σχήμα 9.30. Κατακόρυφες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα υπό κλίση)

➤ **Κατηγορία εδάφους II (3- στρώματα υπο κλίση)**

- Οροφή -31.66 mm
- Δάπεδο 20.08 mm
- Τοιχώματα -12.7 mm



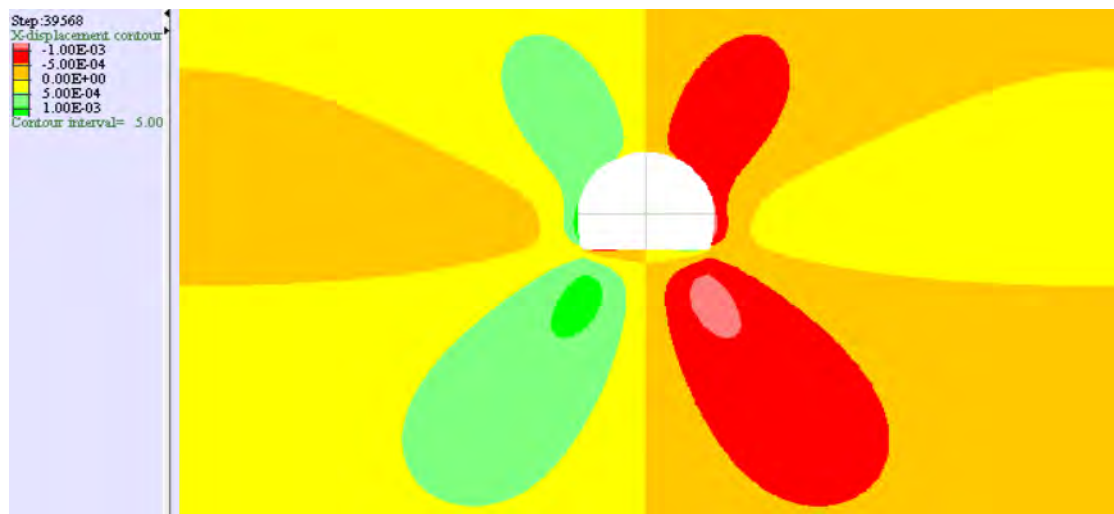
Σχήμα 9.31. Κατακόρυφες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II(3-στρώματα υπό κλίση))

Οριζόντιες Μετατοπίσεις

Παρακάτω παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετατοπίσεις που προκλήθηκαν στα τοιχώματα της σήραγγας. Σημειώνεται ότι οι οριζόντιες μετακινήσεις στην οροφή και στο δάπεδο της κατασκευής είναι μηδενικές.

➤ **Κατηγορία εδάφους I**

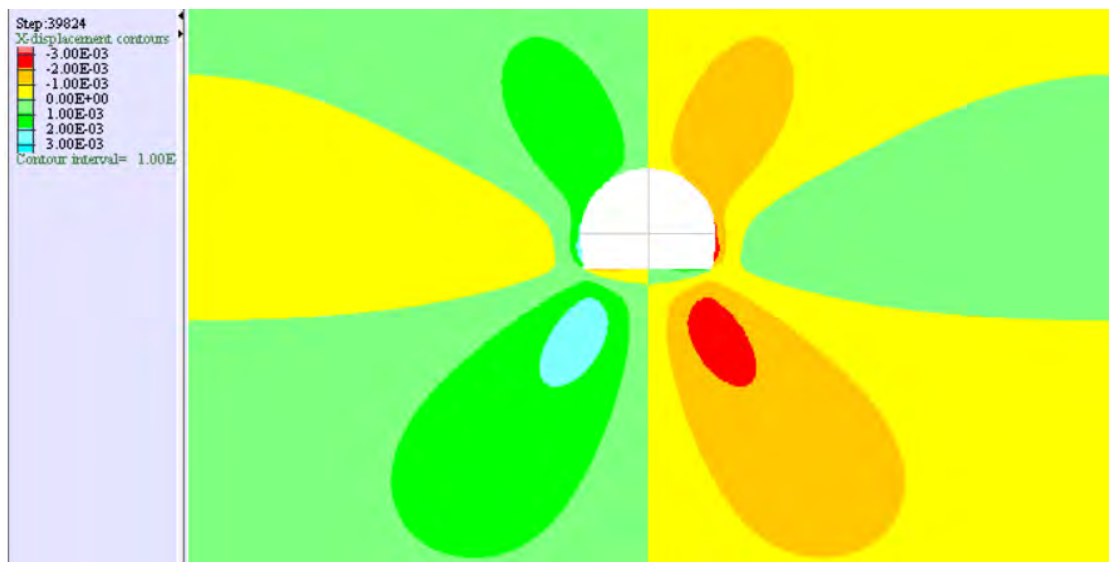
- Τοιχώματα 1.13 mm



Σχήμα 9.32. Οριζόντιες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους I)

➤ **Κατηγορία εδάφους II**

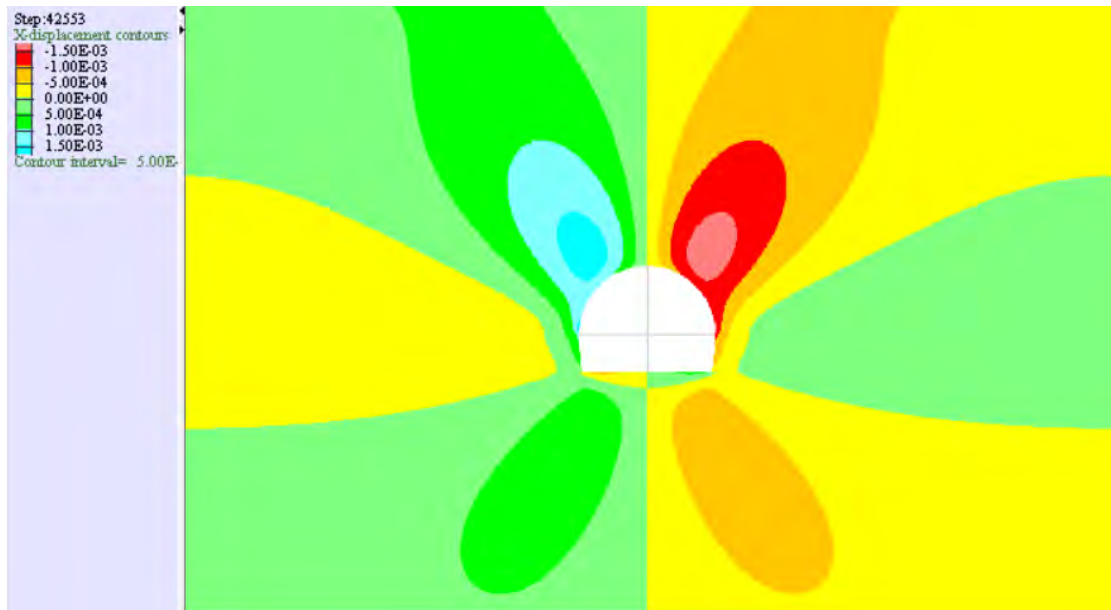
- Τοιχώματα 2.158 mm



Σχήμα 9.33: Οριζόντιες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II)

➤ **Κατηγορία εδάφους II (2- στρώματα)**

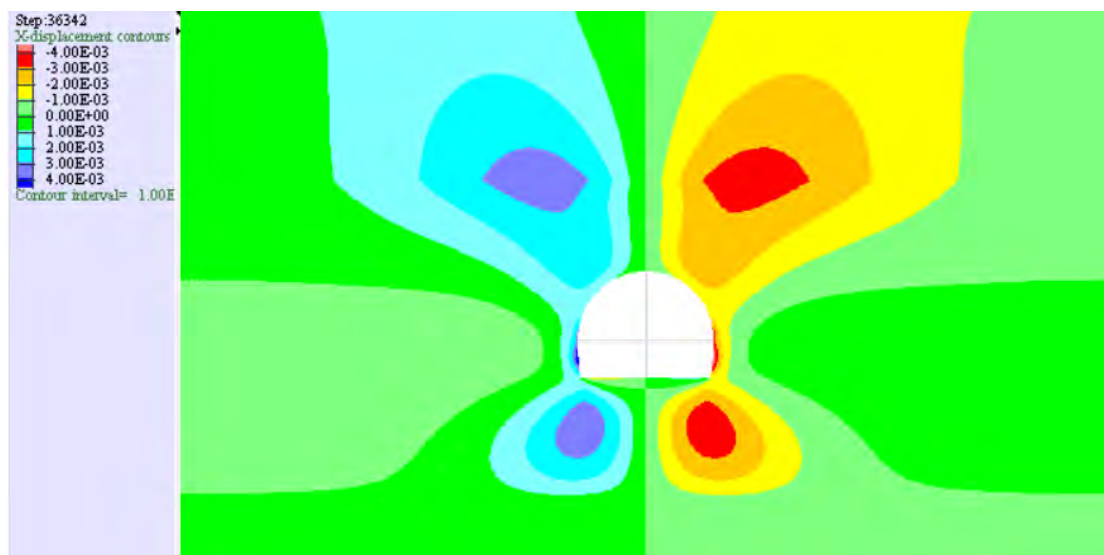
- Τοιχώματα 1.306 mm



Σχήμα 9.34. Οριζόντιες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα)

➤ **Κατηγορία εδάφους II (3- στρώματα)**

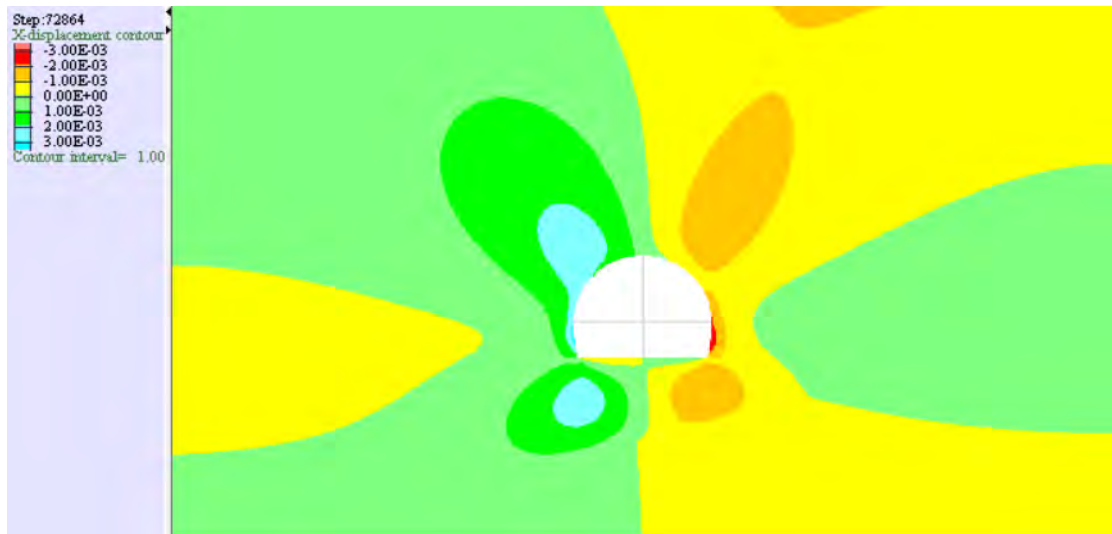
- Τοιχώματα 3.272 mm



Σχήμα 9.35. Οριζόντιες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα)

➤ **Κατηγορία εδάφους II (2- στρώματα υπο κλίση)**

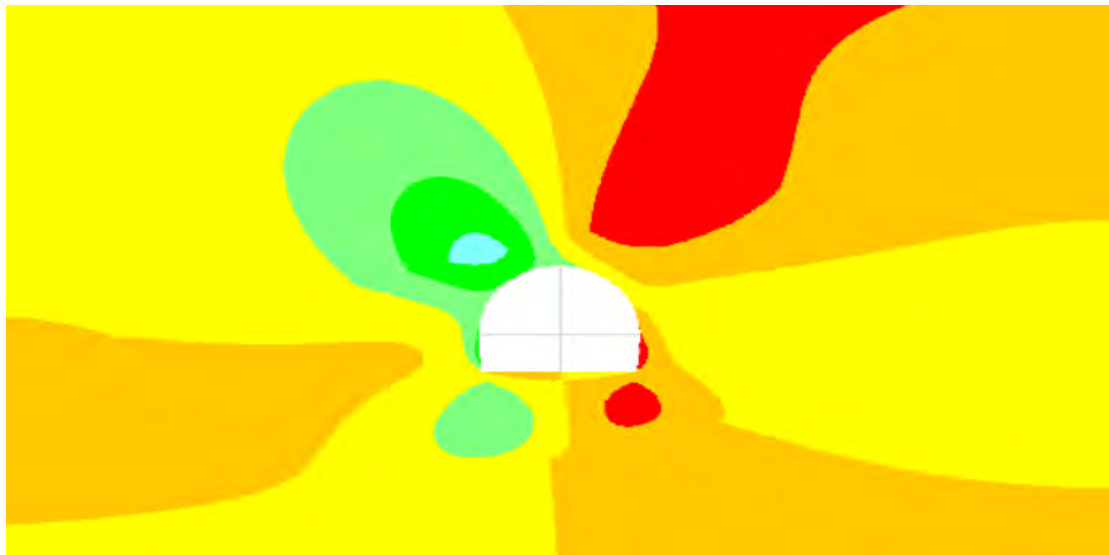
- Τοιχώματα 2.718 mm



Σχήμα 9.36. Οριζόντιες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα υπο κλίση)

➤ **Κατηγορία εδάφους II (3- στρώματα υπο κλίση)**

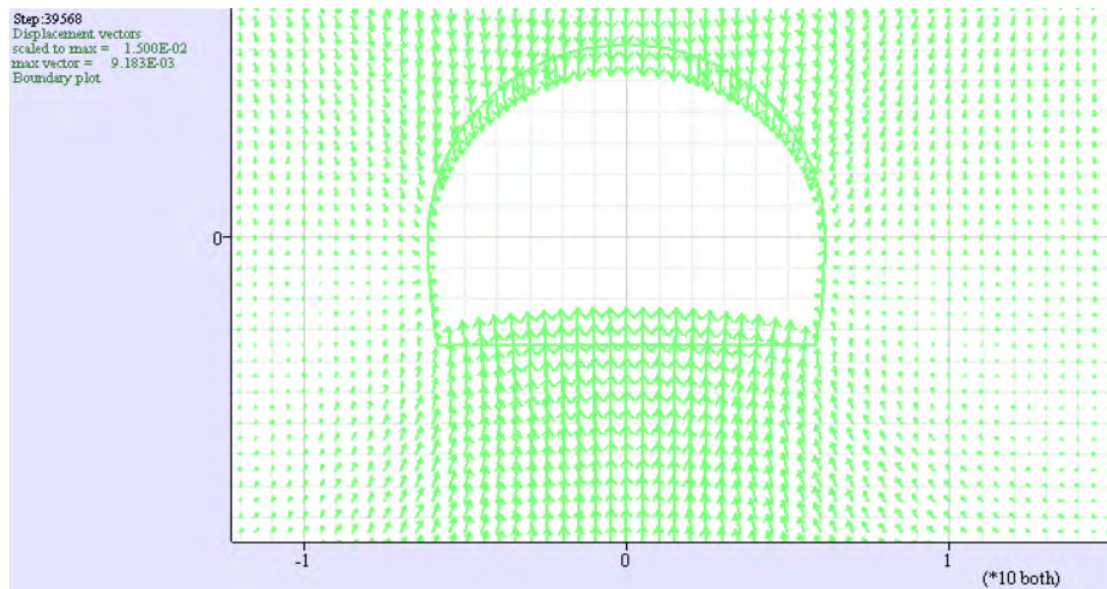
- Τοιχώματα 4.071 mm



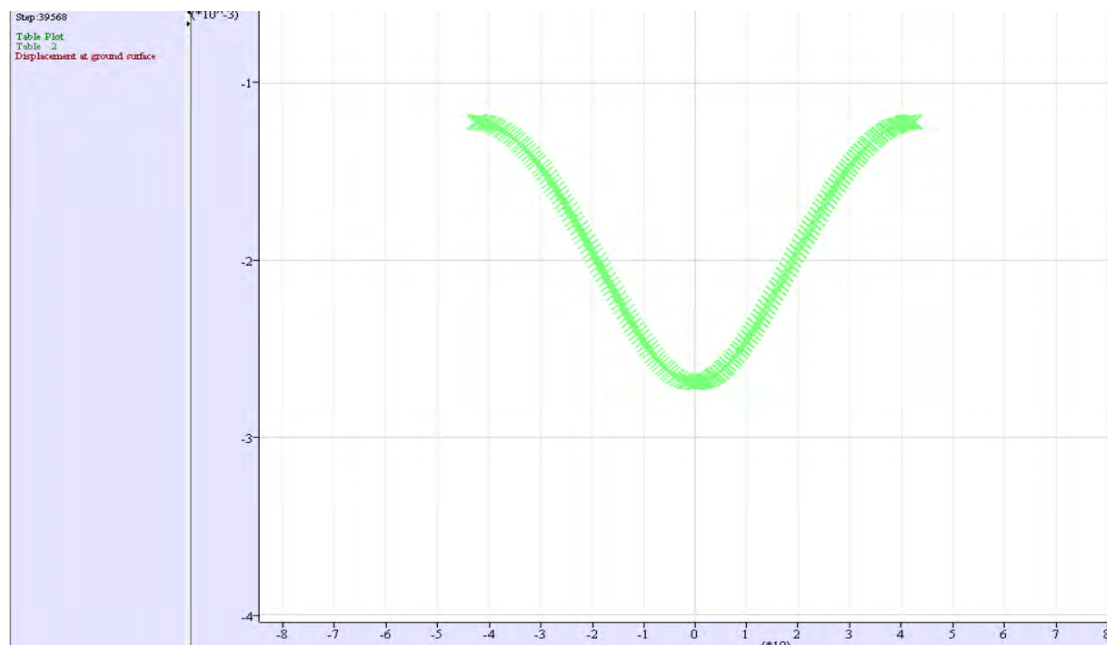
Σχήμα 9.37. Οριζόντιες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα υπο κλίση)

Ολικές μετατοπίσεις

Οι ολικές μετατοπίσεις των κόμβων παρουσιάζονται σαν διανύσματα στο επίπεδο και αποδίδουν μια εικόνα για την ροή των μετακινήσεων στην ευρύτερη περιοχή της γεωλογικής τομής.



Σχήμα 9.38. Ολικές μετατοπίσεις κατά την πλήρη εκσκαφή και προσωρινή υποστήριξη της σήραγγας



Σχήμα 9.39. Ολικές μετατοπίσεις στην επιφάνεια του υπερκείμενου εδάφους κατά την πλήρη εκσκαφή και προσωρινή υποστήριξη της σήραγγας

Οι μέγιστες μετατοπίσεις στην επιφάνεια του εδάφους εμφανίζονται στον άξονα της διατομής της σήραγγας. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές που προέκυψαν για κάθε εδαφικό σχηματισμό.

Πίνακας 9.5. Μέγιστες μετατοπίσεις στην επιφάνεια του υπερκείμενου εδάφους

(FLAC)	Displacement at ground surface (mm)
Κατηγορία εδάφους I	1,5
Κατηγορία εδάφους II	3,2
Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα)	2,9
Κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα)	6,8
Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα υπο κλίση)	3,9
Κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα υπο κλίση)	8,1

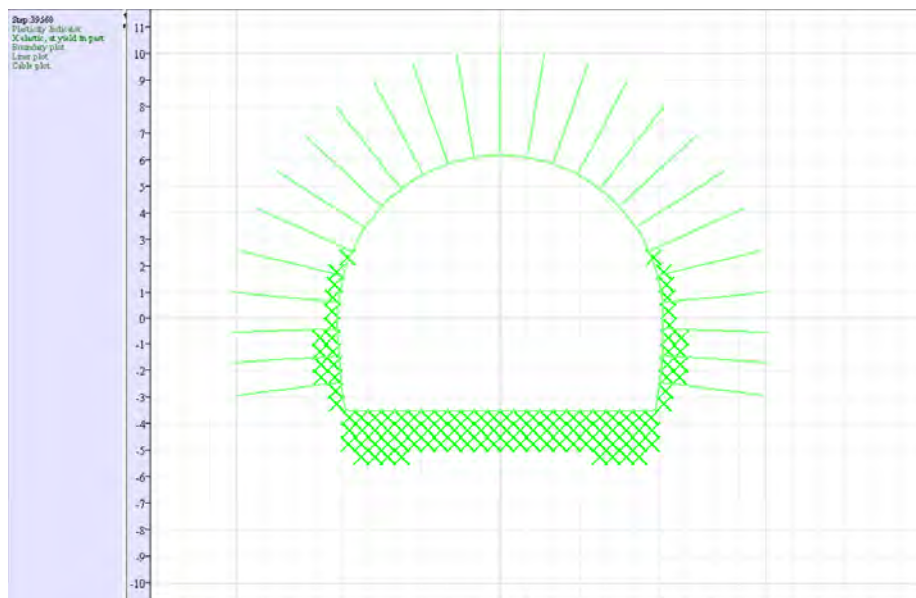
Πίνακας 9.6. Συγκλίσεις σε οροφή, δάπεδο και τοιχώματα

Flac 7.0	u_y (mm) οροφή	u_y (mm) δάπεδο	u_y (mm) τοιχώματα	u_x (mm) τοιχώματα
Κατηγορία εδάφους I	-7,24	9,18	-1,02	1,13
Κατηγορία εδάφους II	-15,15	20,35	-3,54	2,16
Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα)	-13,18	7,36	-1,73	1,31
Κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα)	-26,76	23,09	-9,33	3,27
Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα υπο κλίση)	-15,87	14,79	-5,57	2,72
Κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα υπο κλίση)	-31,66	20,08	-12,7	4,07

Πλαστικοποιημένες περιοχές

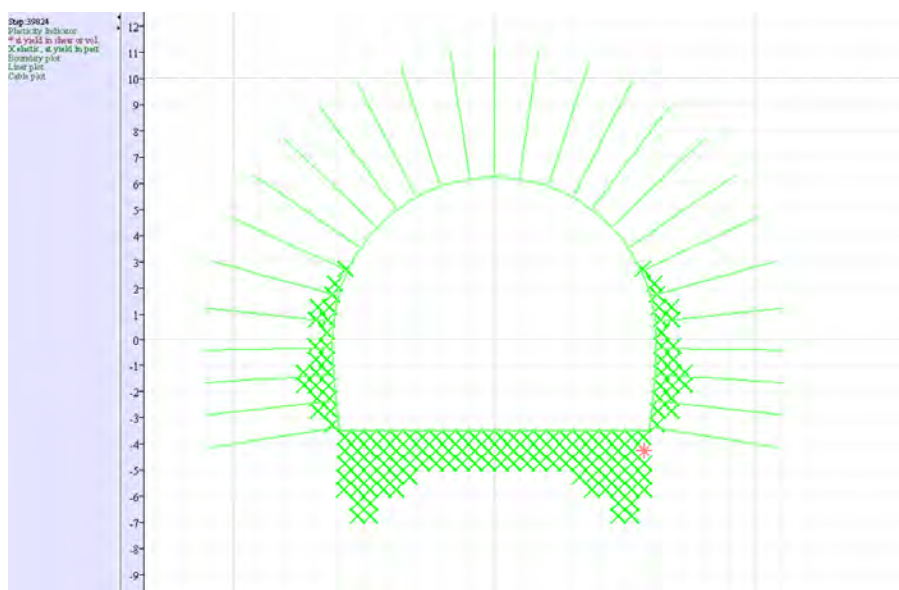
Στα σχήματα 9.40-9.45 φαίνονται οι πλαστικές παραμορφώσεις για κάθε κατηγορία εδαφικού σχηματισμού, όπως αναπτύχθηκαν περιμετρικά της κατασκευής μετά την εφαρμογή των μέτρων αντιστήριξης.

➤ Κατηγορία εδάφους I



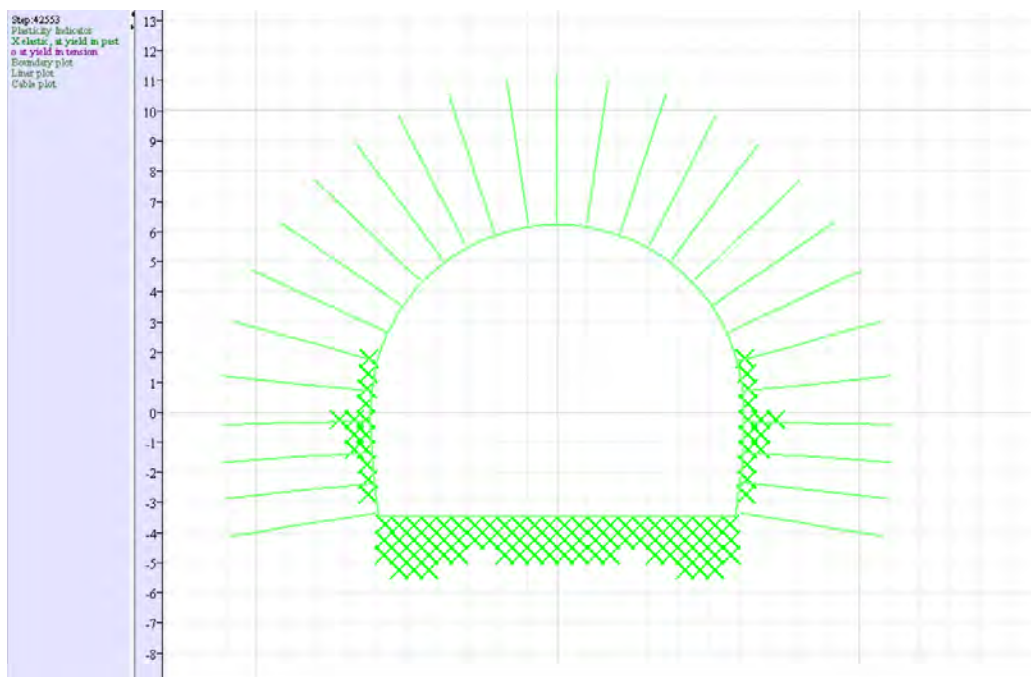
Σχήμα 9.40. Ζώνη πλαστικοποίησης μετά την εφαρμογή των μέτρων άμεσης υποστήριξης (Κατηγορία εδάφους I)

➤ Κατηγορία εδάφους II



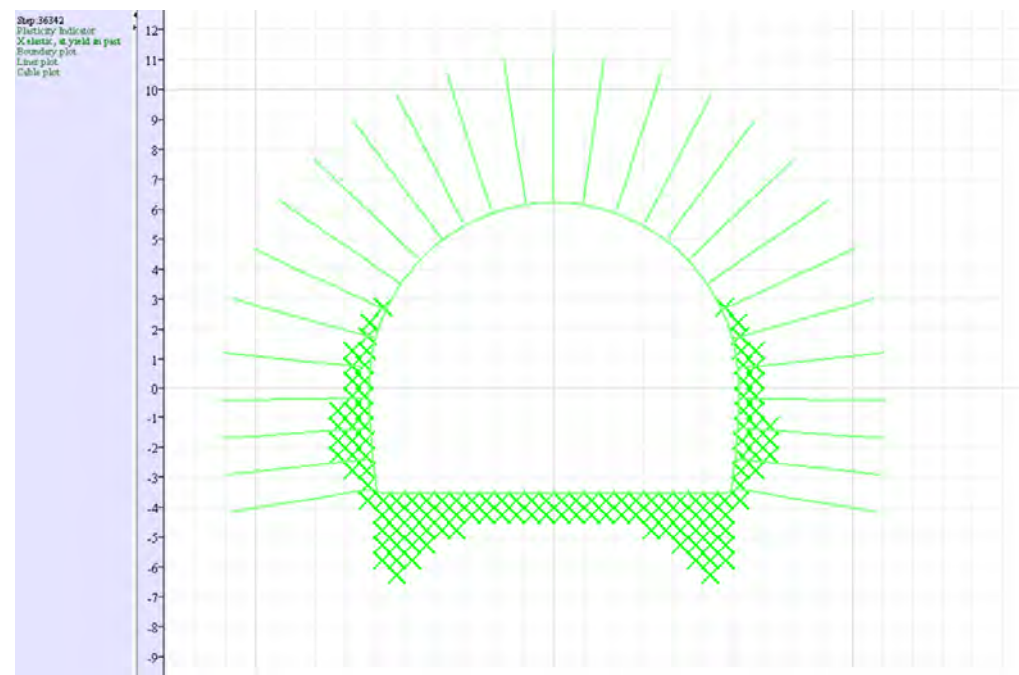
Σχήμα 9.41. Ζώνη πλαστικοποίησης μετά την εφαρμογή των μέτρων άμεσης υποστήριξης (Κατηγορία εδάφους II)

➤ **Κατηγορία εδάφους II (2- στρώματα)**



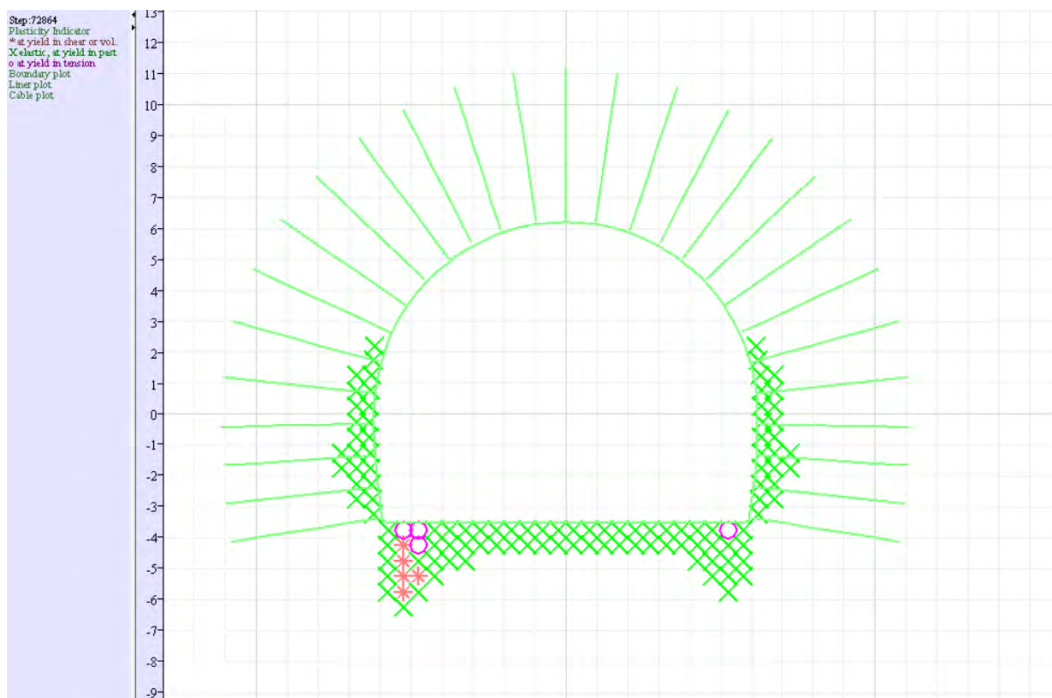
Σχήμα 9.42. Ζώνη πλαστικοποίησης μετά την εφαρμογή των μέτρων άμεσης υποστήριξης (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα)

➤ **Κατηγορία εδάφους II (3- στρώματα)**



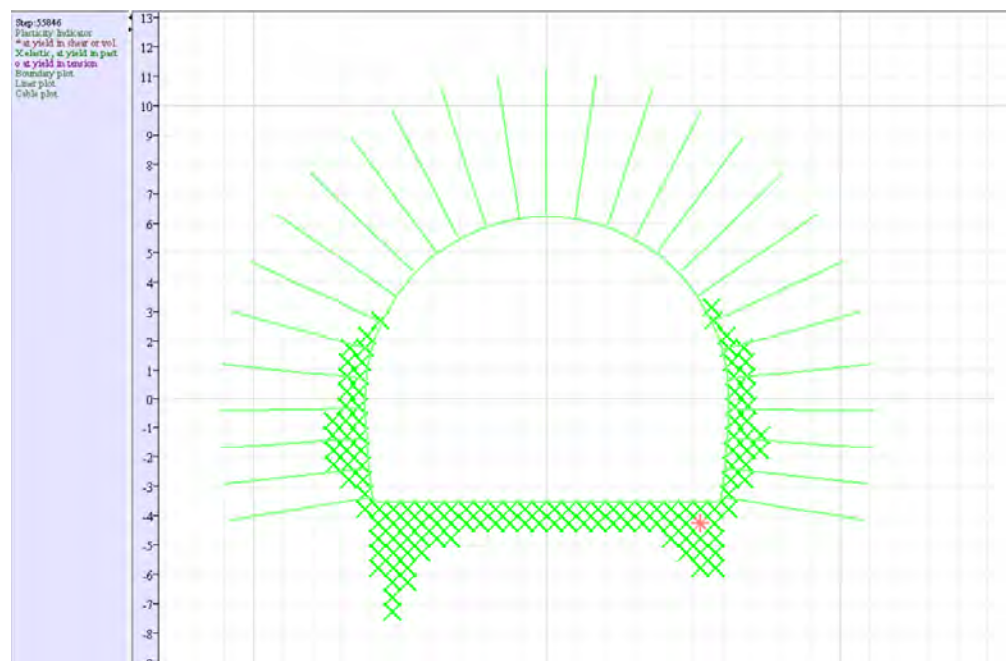
Σχήμα 9.43. Ζώνη πλαστικοποίησης μετά την εφαρμογή των μέτρων άμεσης υποστήριξης (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα)

➤ **Κατηγορία εδάφους II (2- στρώματα υπο κλίση)**



Σχήμα 9.44. Ζώνη πλαστικοποίησης μετά την εφαρμογή των μέτρων άμεσης υποστήριξης (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα υπο κλίση)

➤ **Κατηγορία εδάφους II (3- στρώματα υπο κλίση)**

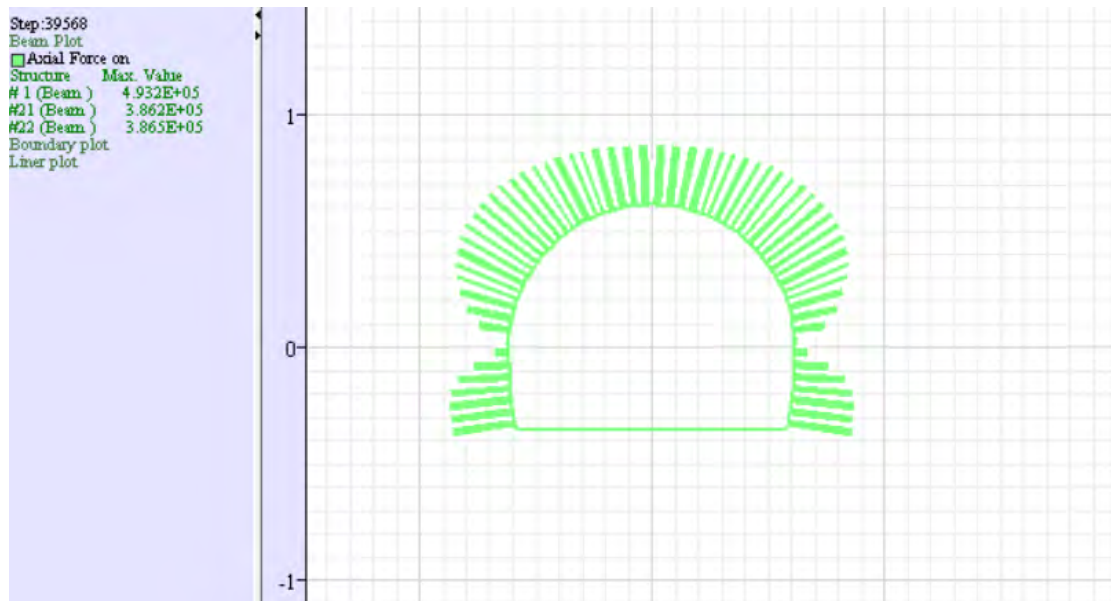


Σχήμα 9.45. Ζώνη πλαστικοποίησης μετά την εφαρμογή των μέτρων άμεσης υποστήριξης (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα υπο κλίση)

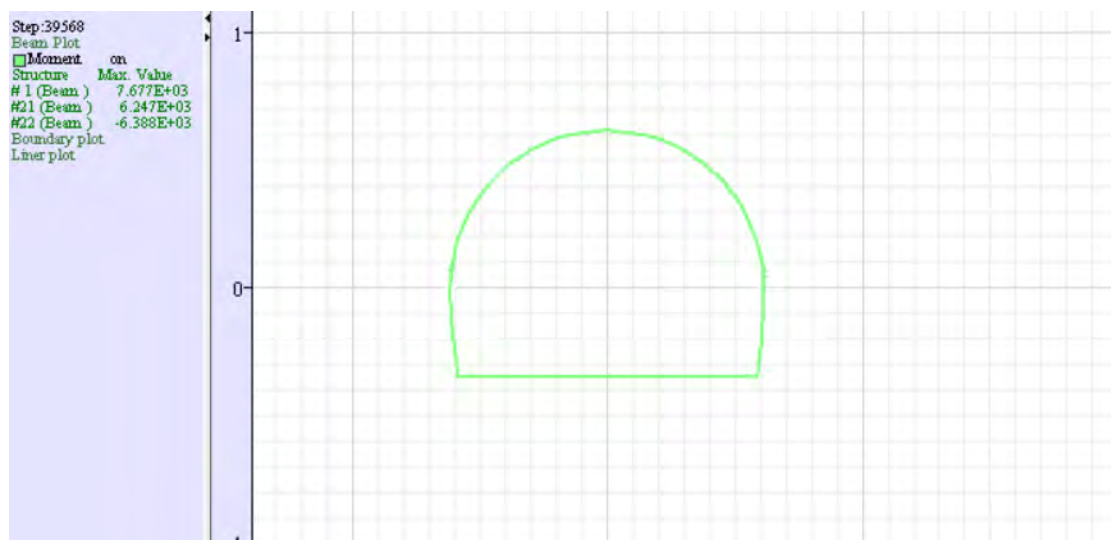
Καταπόνηση μέτρων άμεσης υποστήριξης

Παρακάτω παρουσιάζονται οι μέγιστες αξονικές δυνάμεις και οι μέγιστες καμπτικές ροπές στο εκτοξευόμενο σκυροδέμα καθώς και οι μέγιστες αξονικές στα αγκύρια για κάθε κατηγορία εδάφους.

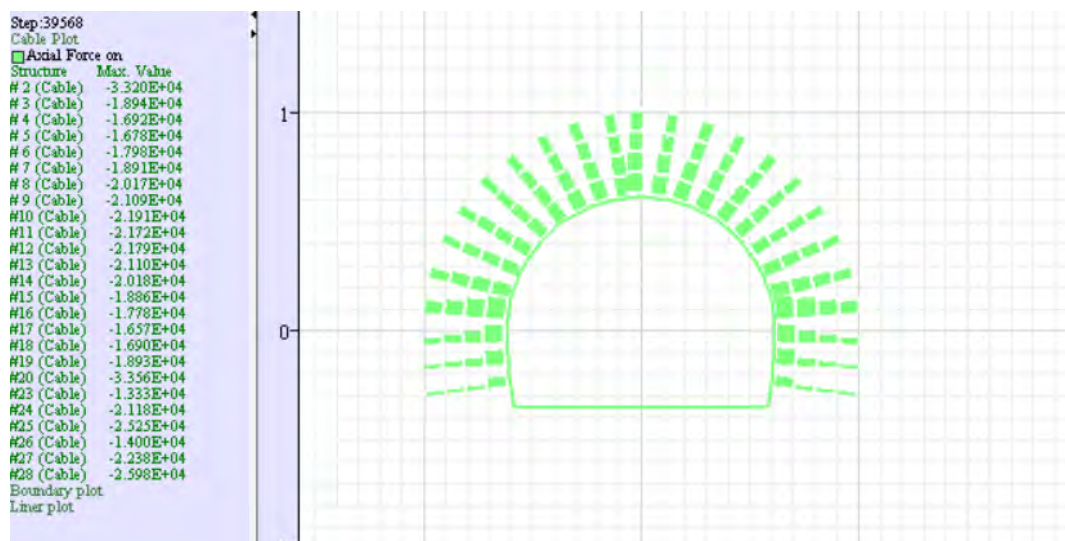
➤ Κατηγορία εδάφους Ι



Σχήμα 9.46. Αξονικές δυνάμεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους Ι)



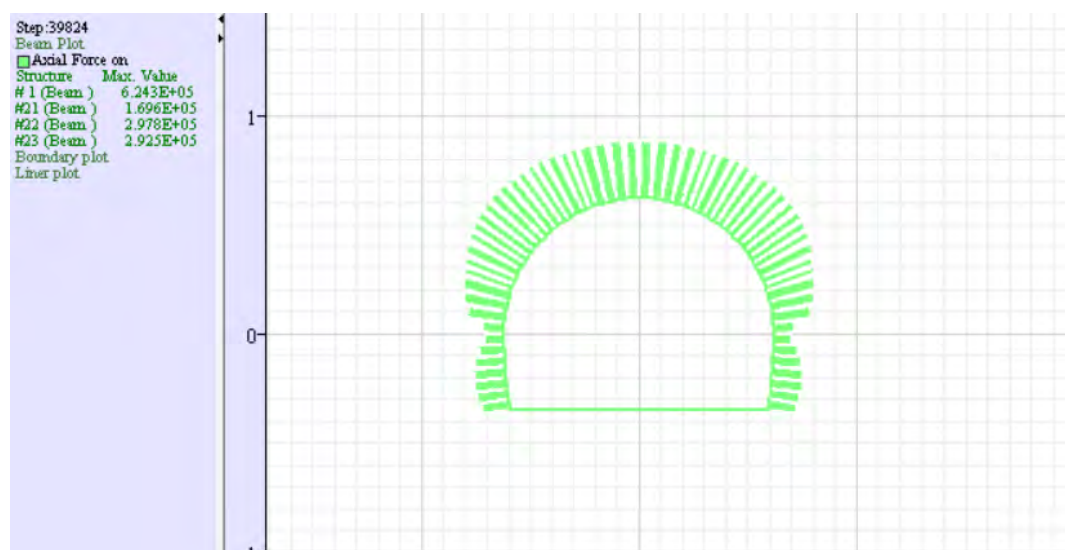
Σχήμα 9.47. Καμπτικές ροπές εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους Ι)



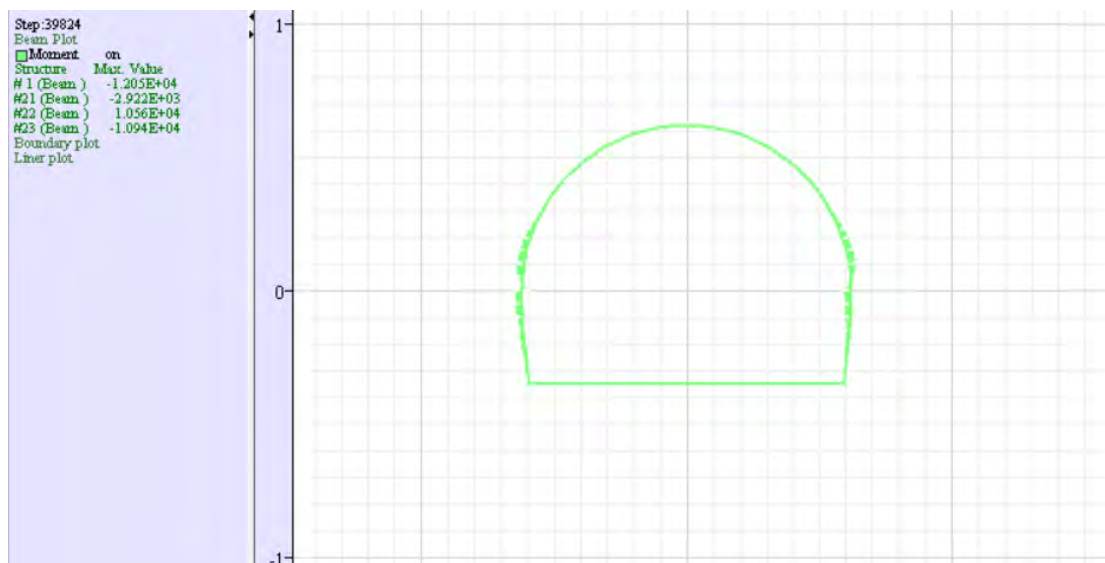
Σχήμα 9.48. Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων (Κατηγορία εδάφους Ι)

- Μέγιστη αξονική δύναμη εκτοξευόμενου σκυροδέματος 493,2 kN και εντοπίζεται στη δεξιά παρειά της άνω ημιδιατομής
- Μέγιστη καμπτική ροπή εκτοξευόμενου σκυροδέματος 7,67 kNm και εντοπίζεται στη δεξιά παρειά της άνω ημιδιατομής
- Μέγιστη αξονική δύναμη αγκυρίων 33,56 kN και εντοπίζεται στη δεξιά παρειά της άνω ημιδιατομής

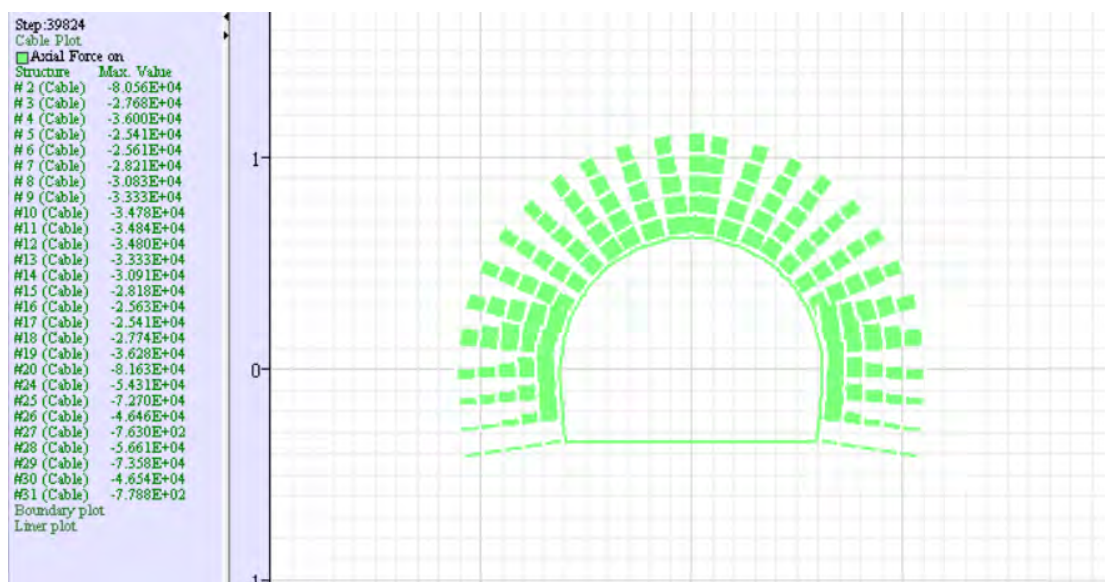
➤ Κατηγορία εδάφους ΙΙ



Σχήμα 9.49. Αξονικές δυνάμεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους ΙΙ)



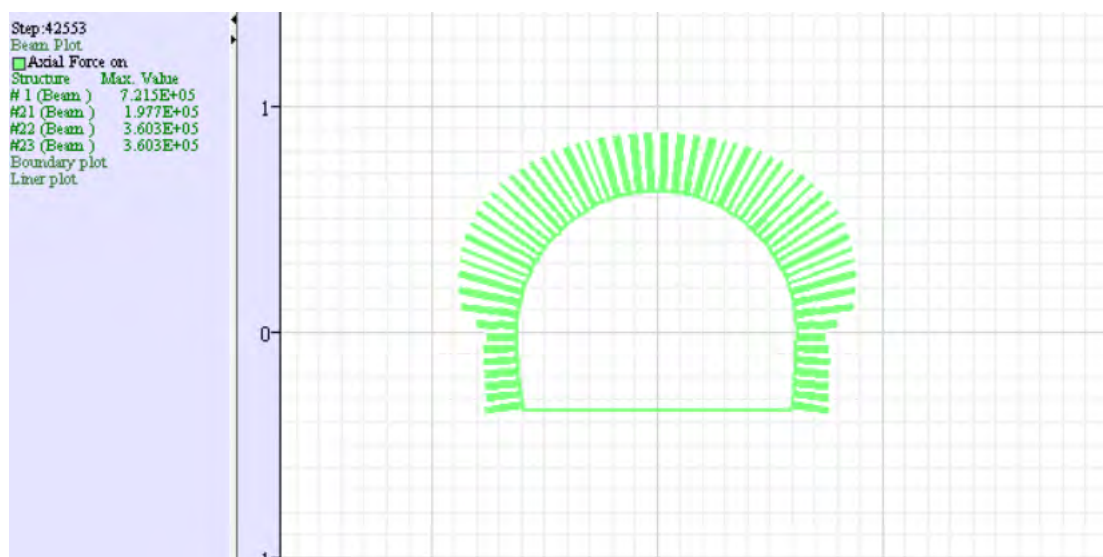
Σχήμα 9.50. Καμπτικές ροπές εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II)



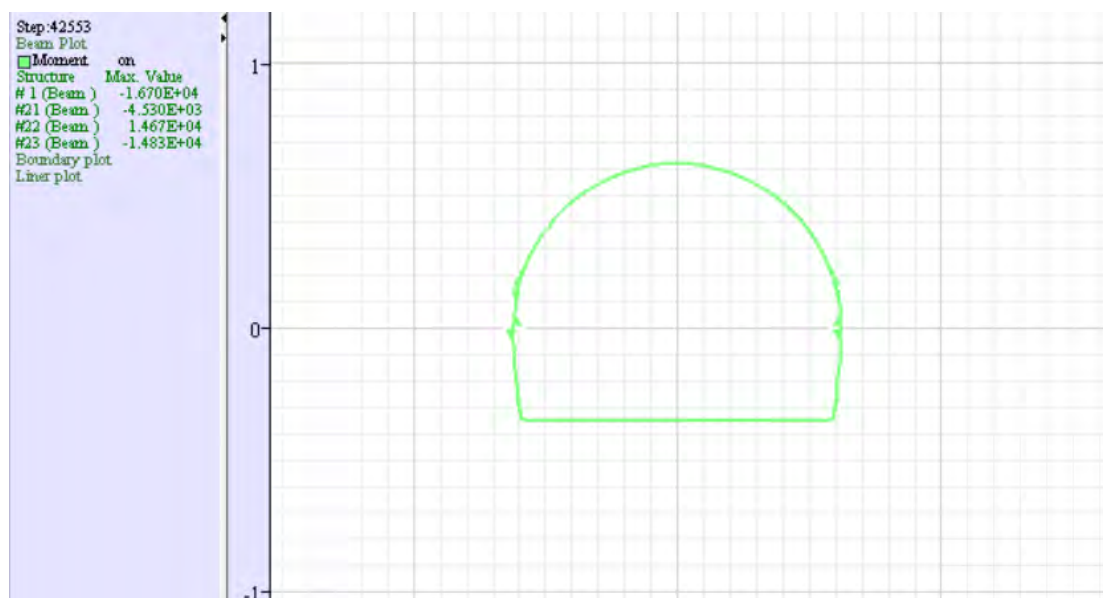
Σχήμα 9.51. Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων (Κατηγορία εδάφους II)

- Μέγιστη αξονική δύναμη εκτοξευόμενου σκυροδέματος 624.3 kN και εντοπίζεται στην αριστερή παρειά της άνω ημιδιατομής
- Μέγιστη καμπτική ροπή εκτοξευόμενου σκυροδέματος 12.05 kNm και εντοπίζεται στη δεξιά παρειά της άνω ημιδιατομής
- Μέγιστη αξονική δύναμη αγκυρίων 81.63 kN και εντοπίζεται στη δεξιά παρειά της άνω ημιδιατομής

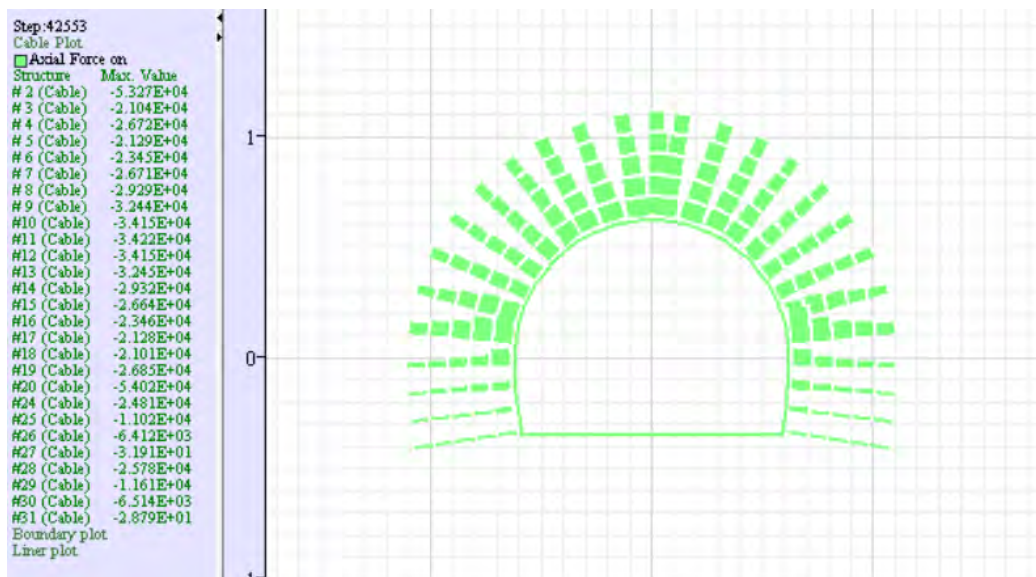
➤ Κατηγορία εδάφους II (2- στρώματα)



Σχήμα 9.52. Αξονικές δυνάμεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II 2- στρώματα)



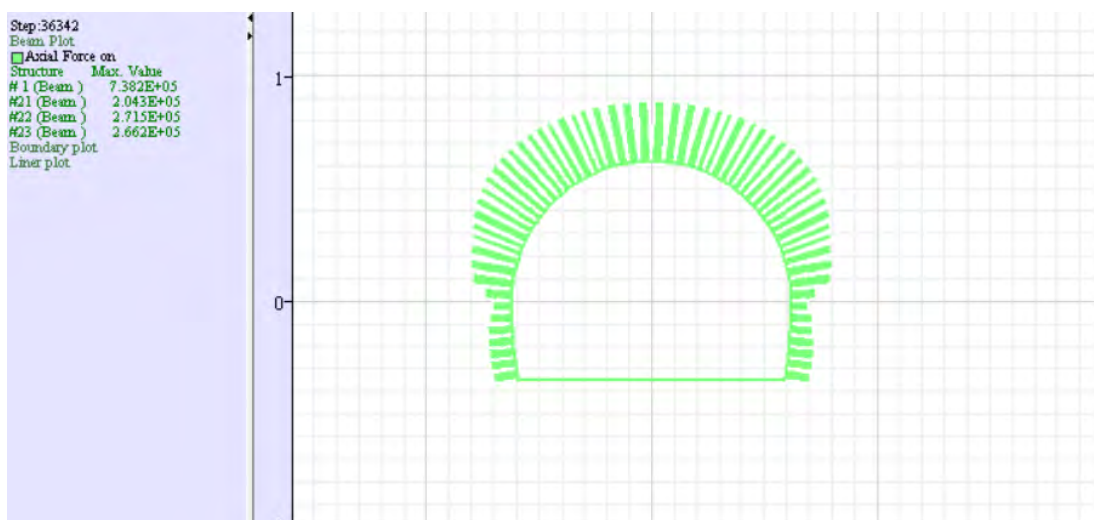
Σχήμα 9.53. Καμπτικές ροπές εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II 2- στρώματα)



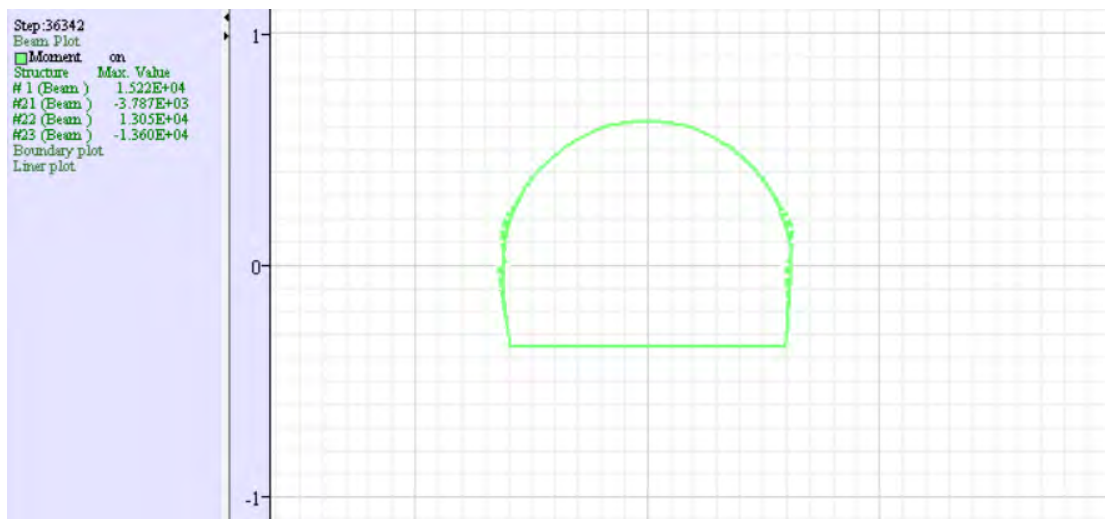
Σχήμα 9.54. Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα)

- Μέγιστη αξονική δύναμη εκτοξευόμενου σκυροδέματος 721.5 kN και εντοπίζεται στην αριστερή παρειά της άνω ημιδιατομής
- Μέγιστη καμπτική ροπή εκτοξευόμενου σκυροδέματος 16.7 kNm και εντοπίζεται στη δεξιά παρειά της άνω ημιδιατομής
- Μέγιστη αξονική δύναμη αγκυρίων 53.27 kN και εντοπίζεται στην αριστερή παρειά της άνω ημιδιατομής

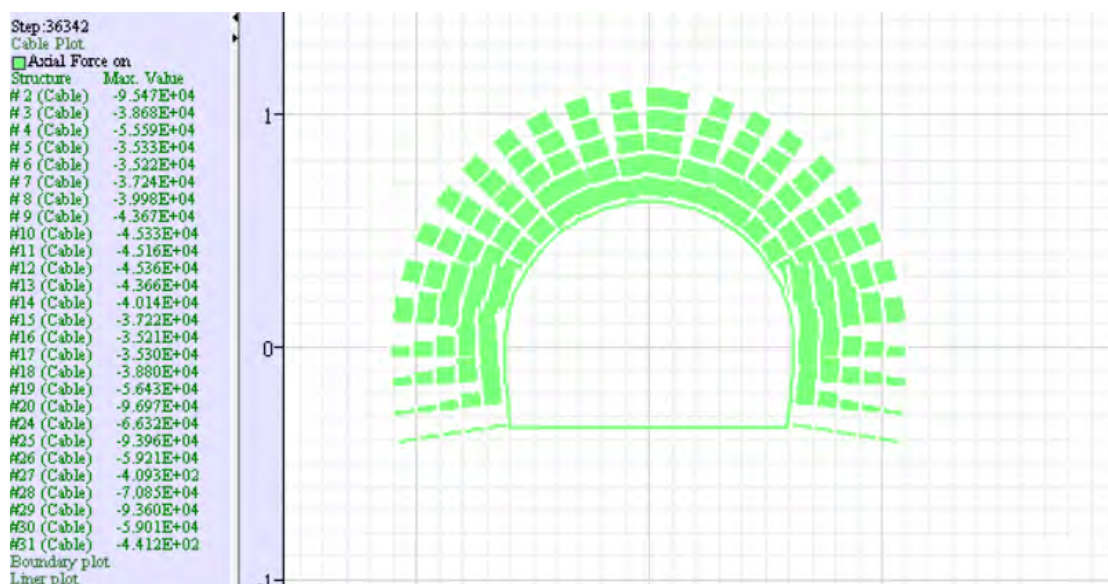
➤ Κατηγορία εδάφους II (3- στρώματα)



Σχήμα 9.55. Αξονικές δυνάμεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα)



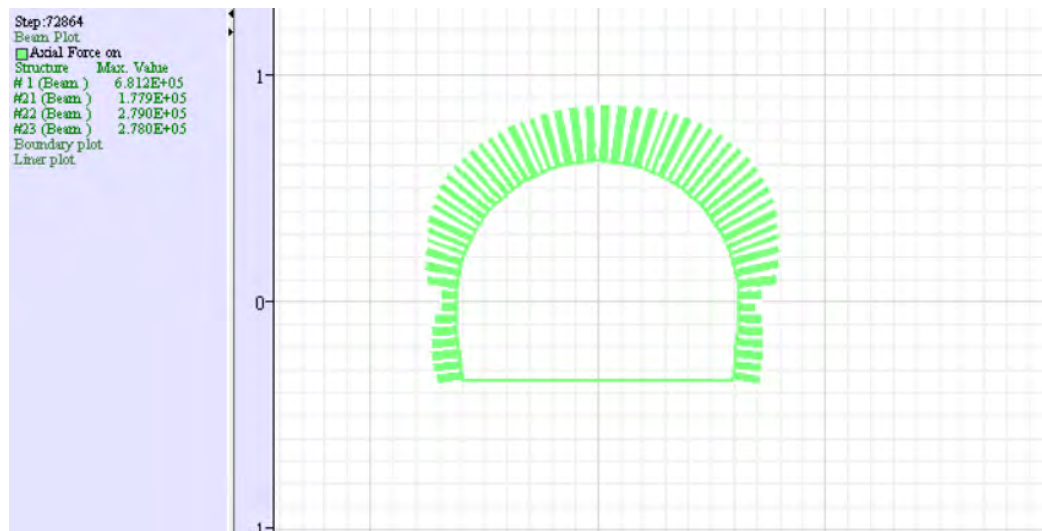
Σχήμα 9.56. Καμπτικές ροπές εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα)



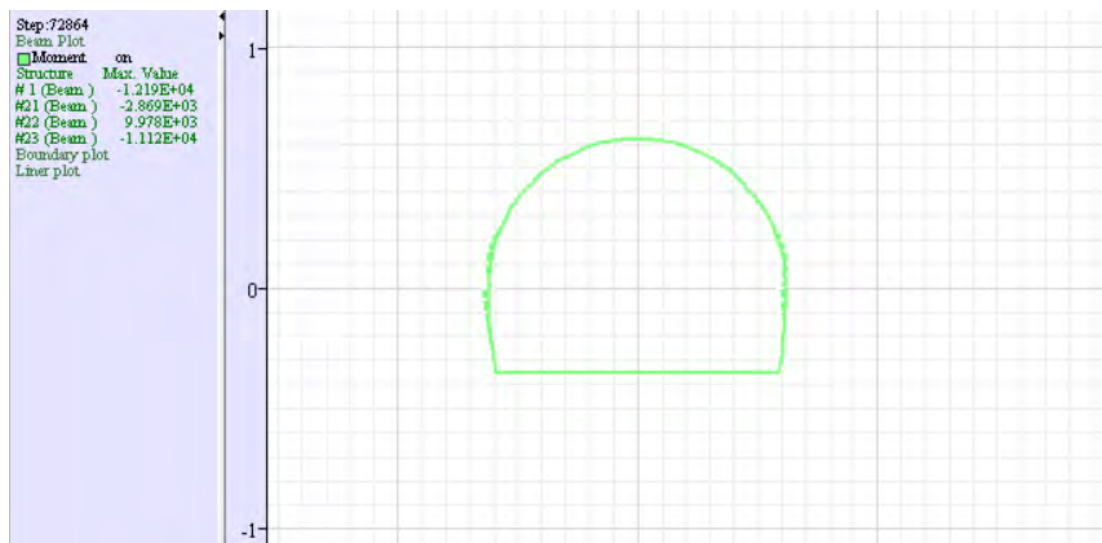
Σχήμα 9.57. Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα)

- Μέγιστη αξονική δύναμη εκτοξευόμενου σκυροδέματος 738.2kN και εντοπίζεται στη δεξιά παρειά της άνω ημιδιατομής
- Μέγιστη καμπτική ροπή εκτοξευόμενου σκυροδέματος 15.22 kNm και εντοπίζεται στη δεξιά παρειά της άνω ημιδιατομής
- Μέγιστη αξονική δύναμη αγκυρίων 96.97kN και εντοπίζεται στη δεξιά παρειά της άνω ημιδιατομής

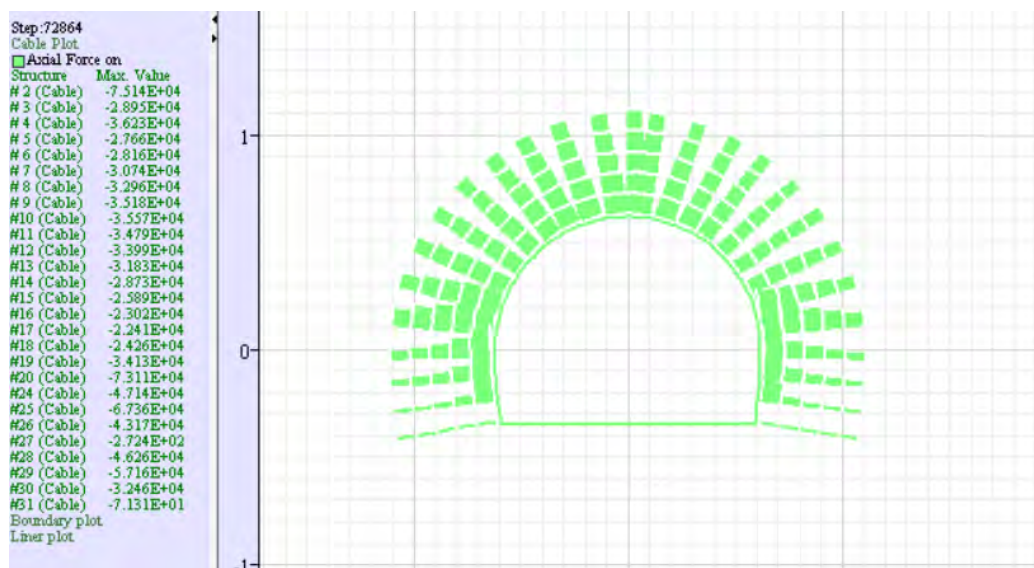
➤ Κατηγορία εδάφους II (2- στρώματα υπο κλίση)



Σχήμα 9.58. Αξονικές δυνάμεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα υπό κλίση)



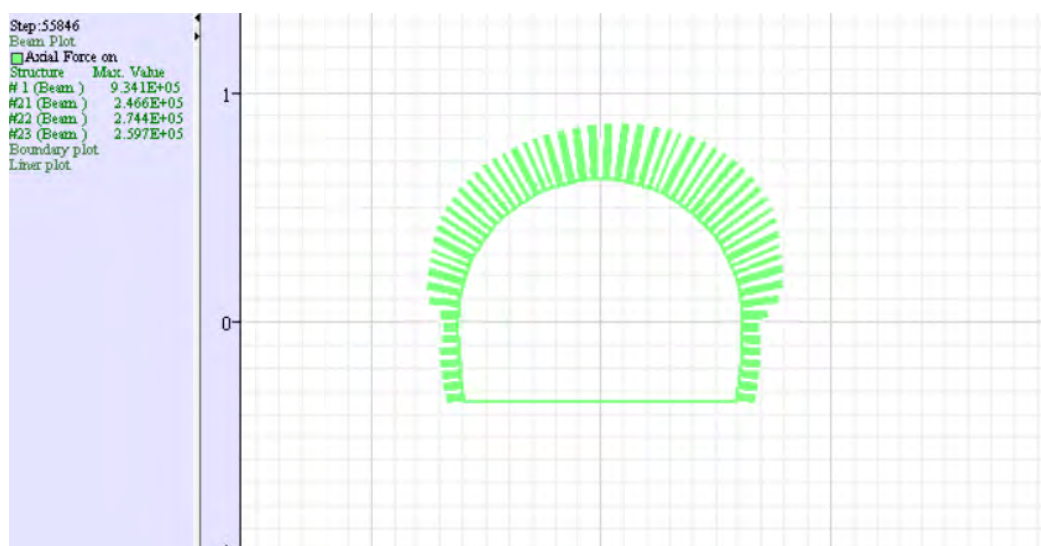
Σχήμα 9.59. Καμπτικές ροπές εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα υπό κλίση)



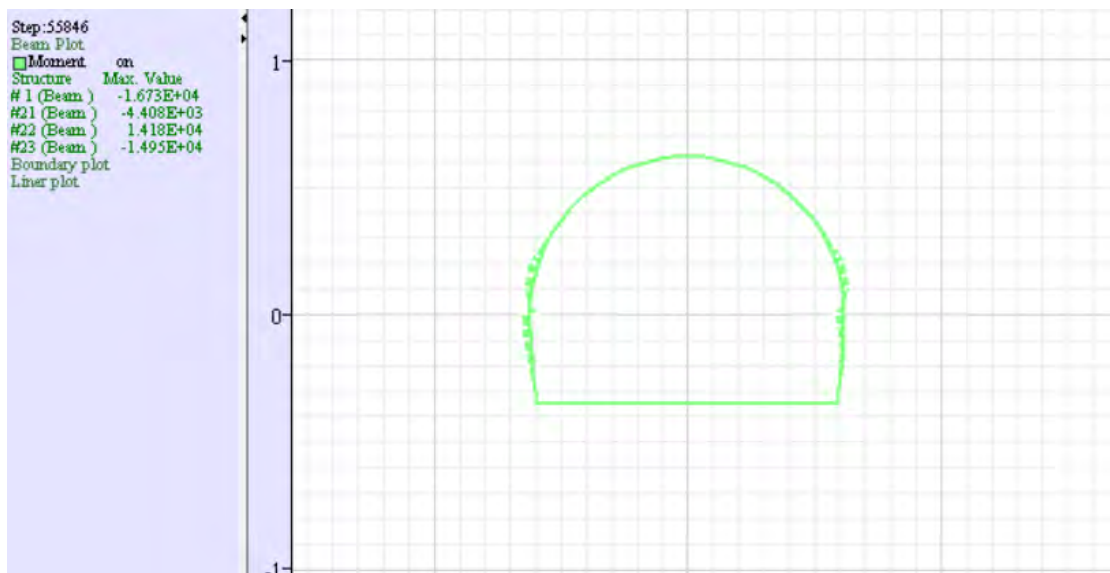
Σχήμα 9.60. Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα_υπό κλίση)

- Μέγιστη αξονική δύναμη εκτοξευόμενου σκυροδέματος 681.2 kN και εντοπίζεται στη δεξιά παρειά της άνω ημιδιατομής
- Μέγιστη καμπτική ροπή εκτοξευόμενου σκυροδέματος 12.19 kNm και εντοπίζεται στη δεξιά παρειά της άνω ημιδιατομής
- Μέγιστη αξονική δύναμη αγκυρίων 75.14 kN και εντοπίζεται στην αριστερή παρειά της άνω ημιδιατομής

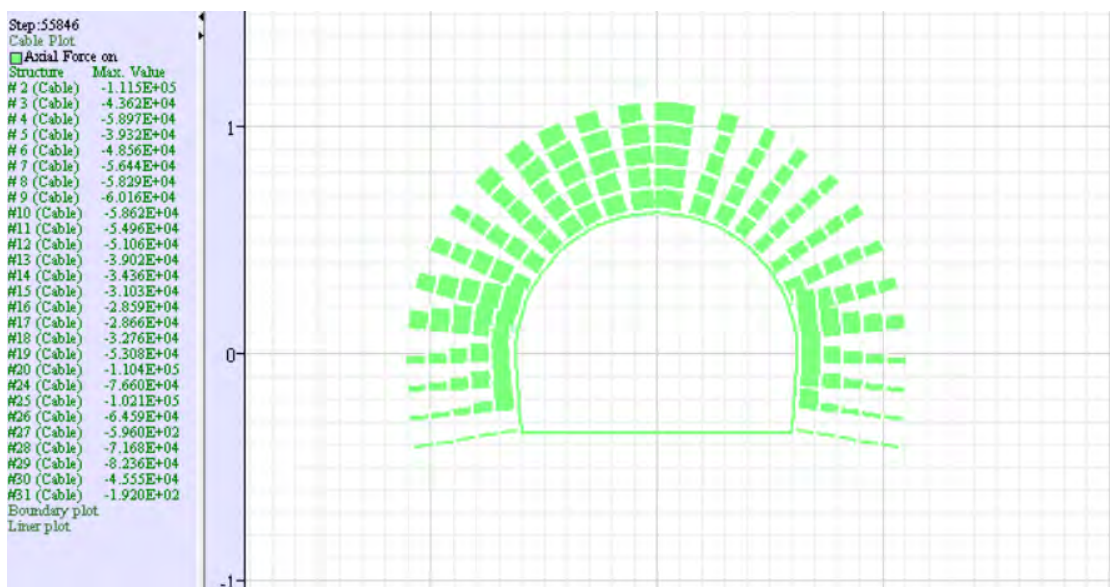
➤ **Κατηγορία εδάφους II (3- στρώματα υπο κλίση)**



Σχήμα 9.61. Αξονικές δυνάμεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα υπό κλίση)



Σχήμα 9.62. Καμπτικές ροπές εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα υπο κλίση)



Σχήμα 9.63 : Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα_υπό κλίση)

- Μέγιστη αξονική δύναμη εκτοξευόμενου σκυροδέματος 934.1 kN και εντοπίζεται στη δεξιά παρειά της άνω ημιδιατομής
- Μέγιστη καμπτική ροπή εκτοξευόμενου σκυροδέματος 16.73 kNm και εντοπίζεται στη δεξιά παρειά της άνω ημιδιατομής
- Μέγιστη αξονική δύναμη αγκυρίων 111.5 kN και εντοπίζεται στην αριστερή παρειά της άνω ημιδιατομής

Παρατηρείται ότι η μέγιστη αξονική δύναμη που ασκείται στα αγκύρια εντοπίζεται στο αγκύριο που βρίσκεται στην παρειά της σήραγγας.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι μέγιστες αξονικές δυνάμεις στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και στα αγκύρια και οι μέγιστες καμπτικές ροπές στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, όπως προέκυψαν από την προσομοίωση κάθε κατηγορίας εδαφικού σχηματισμού.

Πίνακας 9.7. Καταπονήσεις μέτρων άμεσης υποστήριξης για όλες τις κατηγορίες

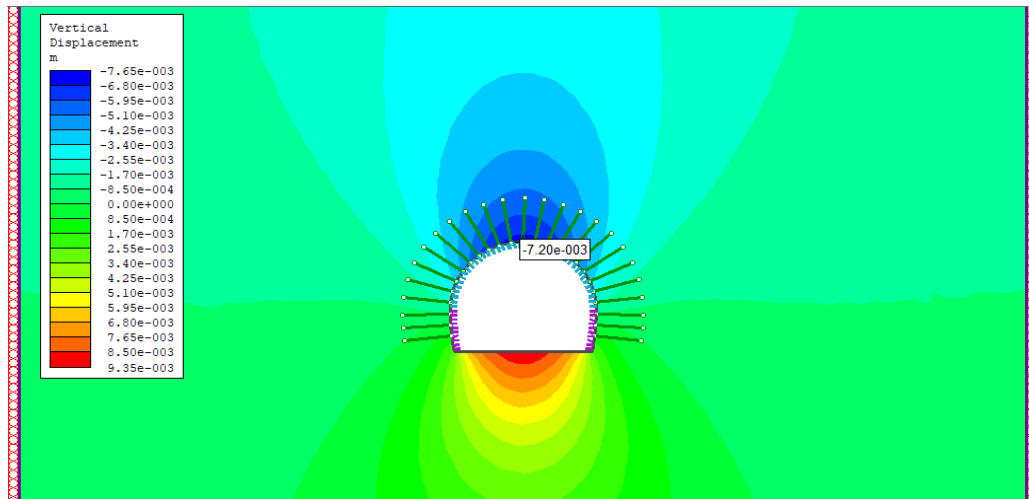
Flac 7.0	Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα		Αγκύρια
	N _{max} (kN)	M _{max} (kNm)	N _{max} (kN)
Κατηγορία εδάφους I	493,2	7,67	33,56
Κατηγορία εδάφους II	624,3	12,05	81,63
Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα)	721,5	16,7	53,27
Κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα)	738,2	15,22	96,97
Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα υπο κλίση)	681,2	12,19	75,14
Κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα υπο κλίση)	934,1	16,73	111,5

9.3.2 Αποτελέσματα με χρήση του προγράμματος Phase² 8.0

Κατακόρυφες Μετατοπίσεις

➤ Κατηγορία εδάφους I

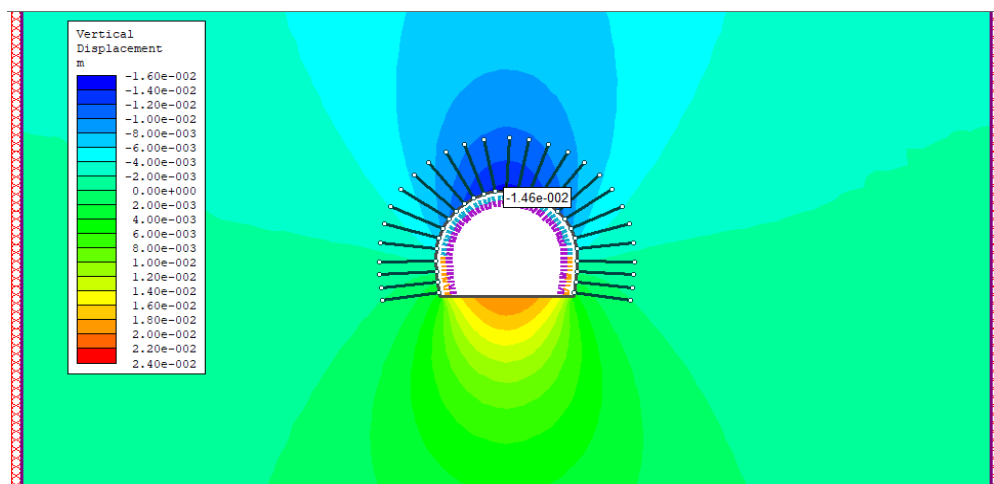
- Οροφή: -7.20 mm
- Δάπεδο: 9.13 mm
- Τοιχώματα: -0.965 mm



Σχήμα 9.63. Κατακόρυφες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους I)

➤ Κατηγορία εδάφους II

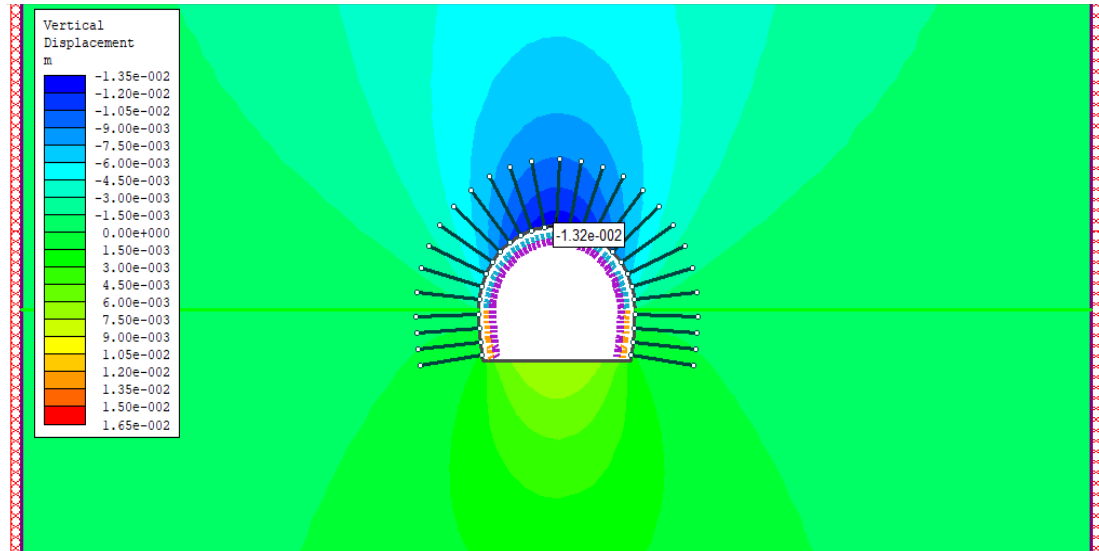
- Οροφή: -14.6 mm
- Δάπεδο: 20.1 mm
- Τοιχώματα: -3.12 mm



Σχήμα 9.64. Κατακόρυφες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδαφους II)

➤ **Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα)**

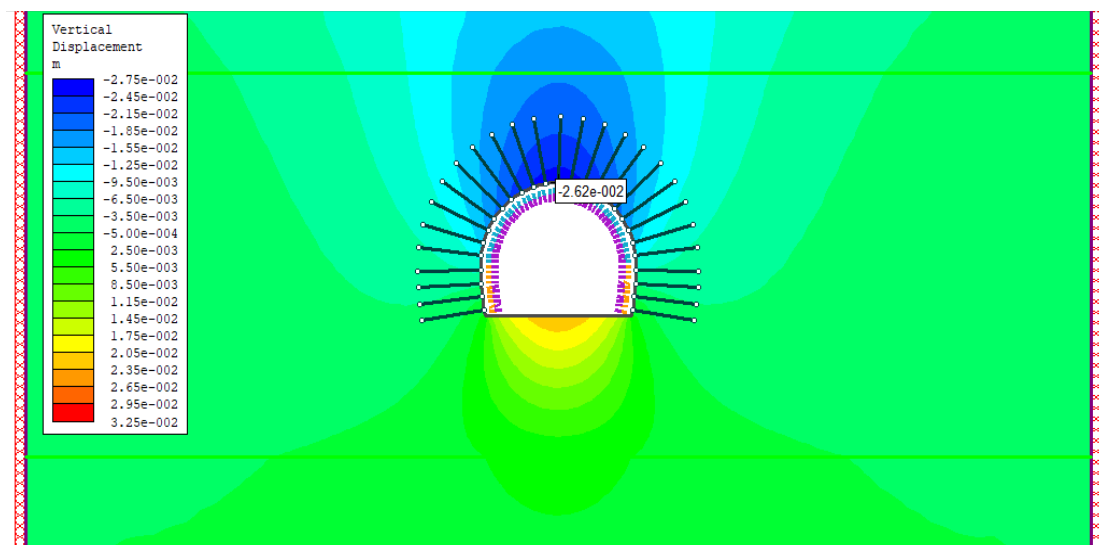
- Οροφή: -13.2 mm
- Δάπεδο: 7.34 mm
- Τοιχώματα: -2.01 mm



Σχήμα 9.64. Κατακόρυφες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα)

➤ **Κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα)**

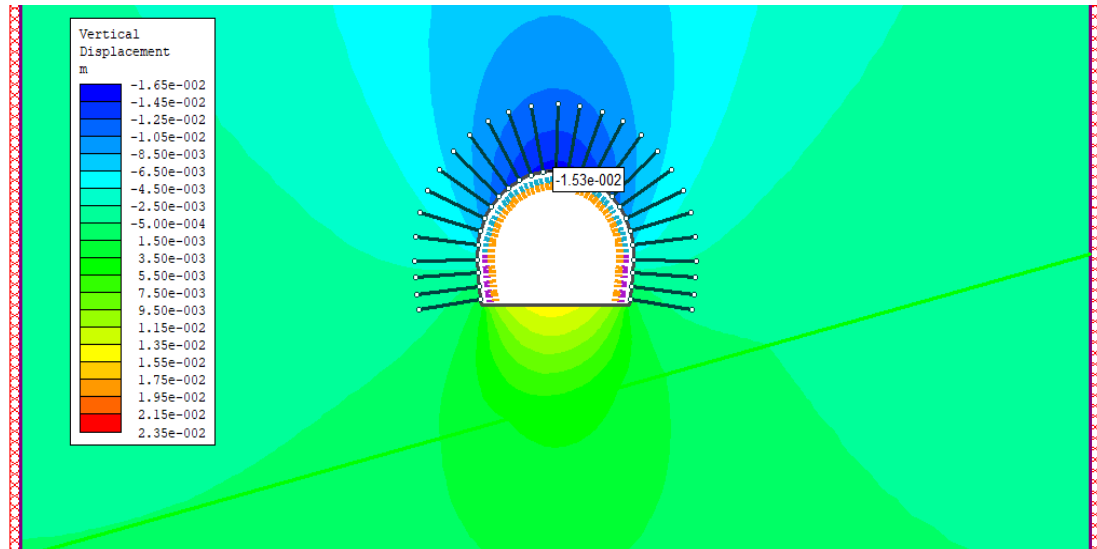
- Οροφή: -26.2 mm
- Δάπεδο: 22.8 mm
- Τοιχώματα: -8.77 mm



Σχήμα 9.65. Κατακόρυφες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα)

➤ **Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα υπό κλίση)**

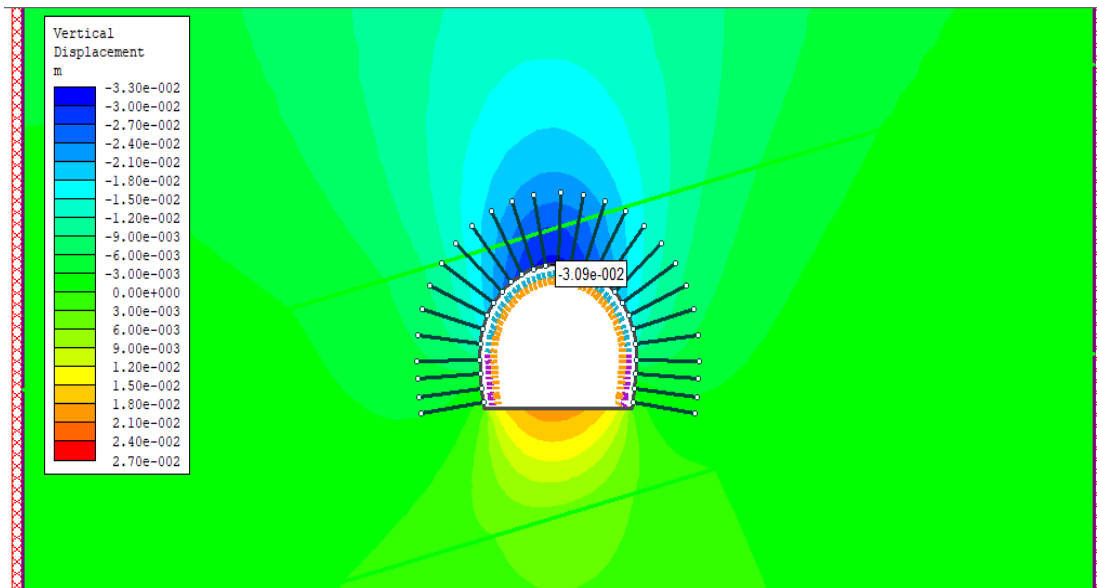
- Οροφή: -15.3 mm
- Δάπεδο: 14.5 mm
- Τοιχώματα: -4.52 mm



Σχήμα 9.66. Κατακόρυφες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα υπό κλίση)

➤ **Κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα υπό κλίση)**

- Οροφή: -30.9 mm
- Δάπεδο: 19.7 mm
- Τοιχώματα: -10.1 mm

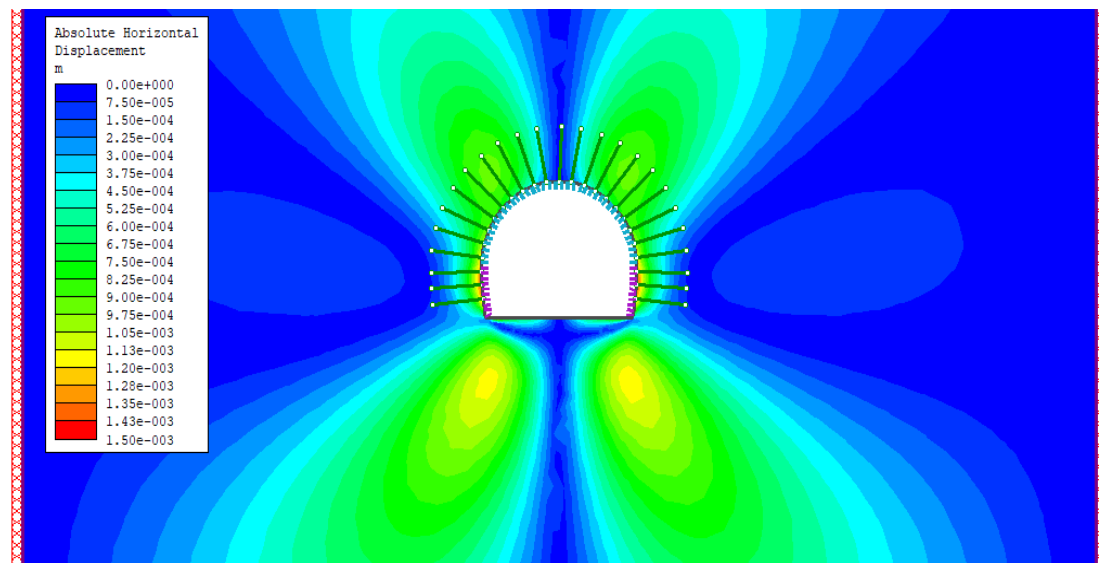


Σχήμα 9.67. Κατακόρυφες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα υπό κλίση)

Οριζόντιες Μετατοπίσεις

➤ Κατηγορία εδάφους I

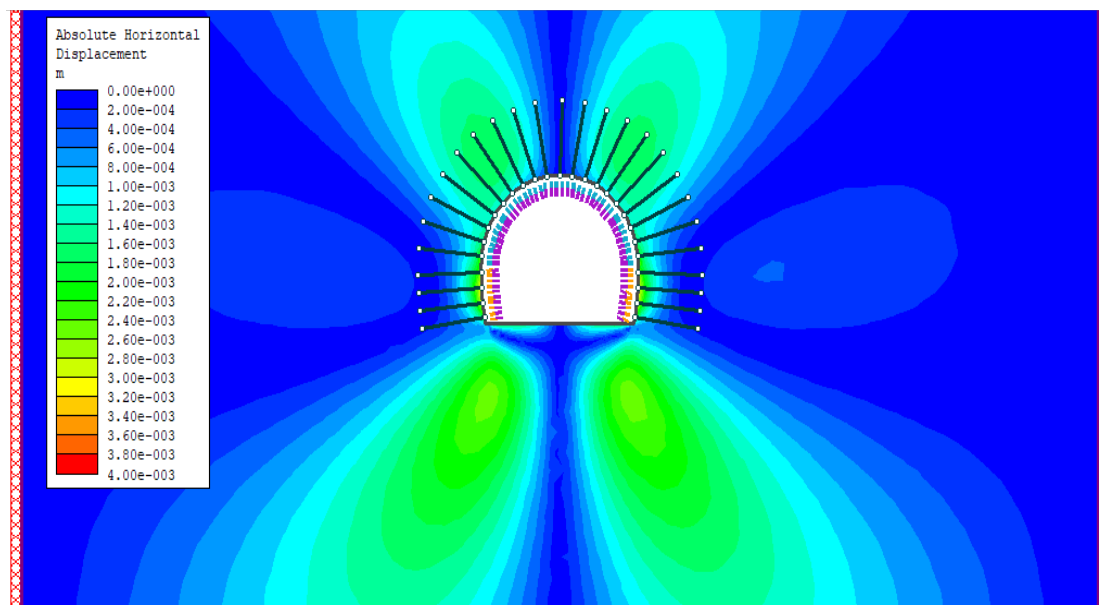
- Τοιχώματα: 1.25 mm



Σχήμα 9.68. Οριζόντιες μετατοπίσεις (κατηγορία εδάφους I)

➤ Κατηγορία εδάφους II

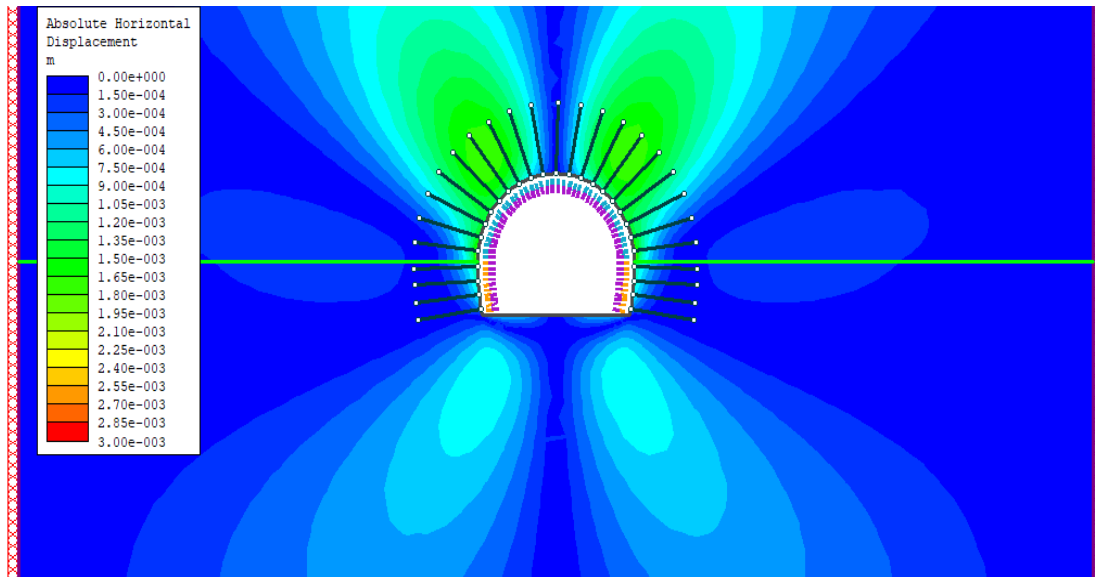
- Τοιχώματα: 2.34 mm



Σχήμα 9.69. Οριζόντιες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II)

➤ **Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα)**

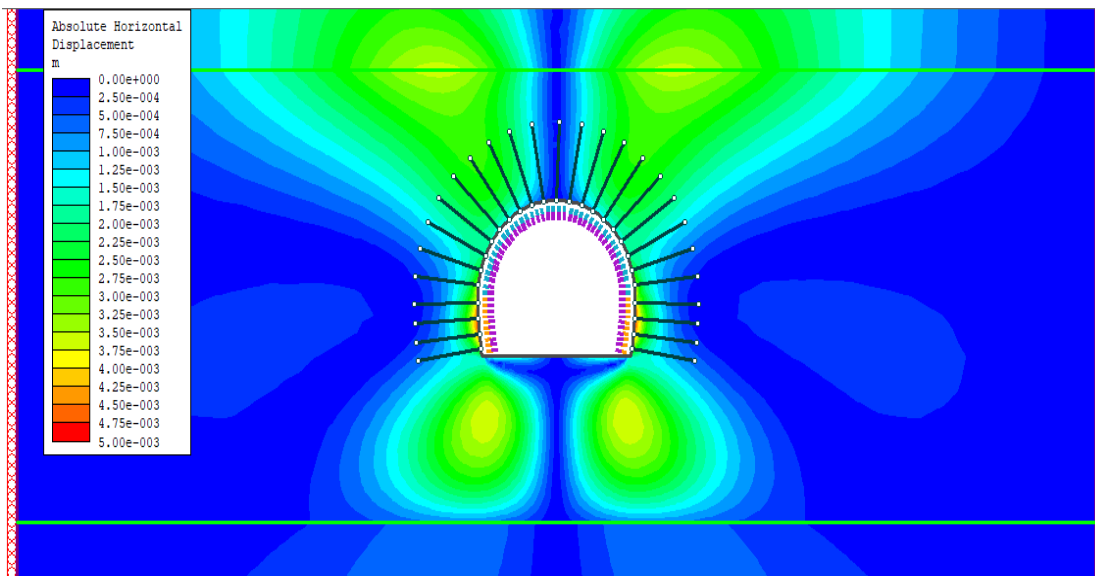
- Τοιχώματα: 1.72 mm



Σχήμα 9.70. Οριζόντιες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα)

➤ **Κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα)**

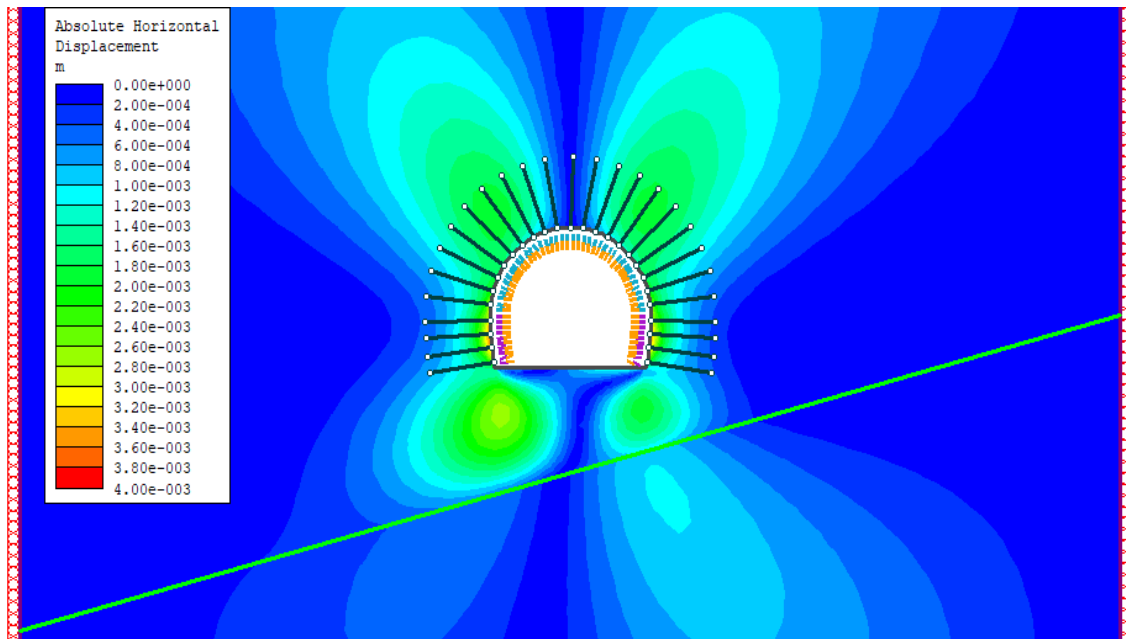
- Τοιχώματα: 3.78 mm



Σχήμα 9.71. Οριζόντιες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα)

➤ **Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα υπό κλίση)**

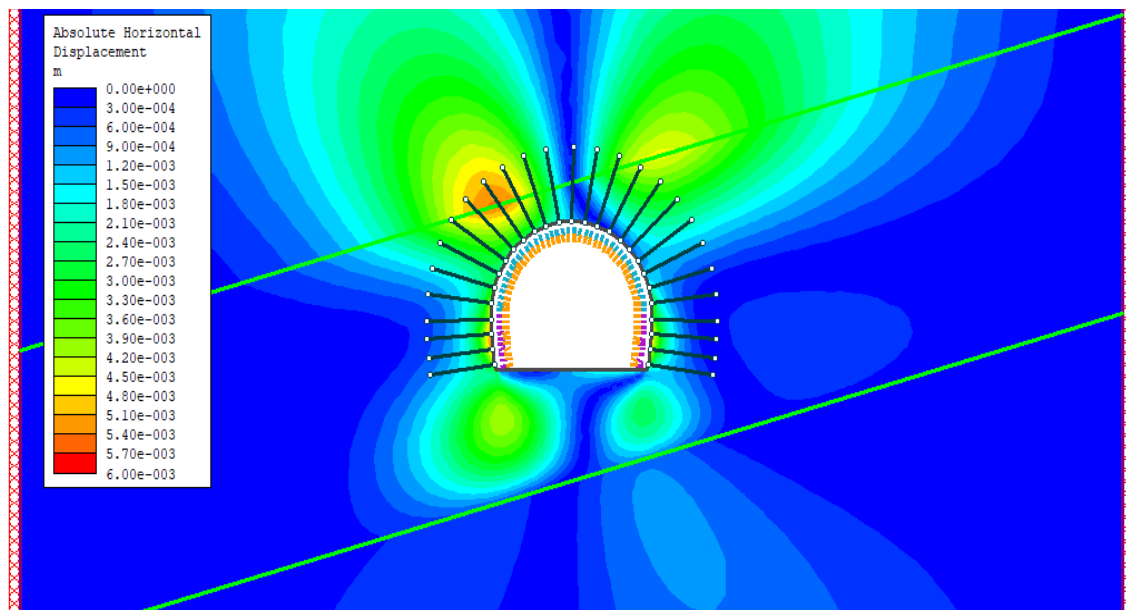
- Τοιχώματα: 2.91 mm



Σχήμα 9.72. Οριζόντιες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα υπό κλίση)

➤ **Κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα υπό κλίση)**

- Τοιχώματα: 4.41 mm



Σχήμα 9.73. Οριζόντιες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα υπό κλίση)

Ολικές Μετατοπίσεις

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι ολικές μετατοπίσεις για τις κατηγορίες εδάφους I και II στους διάφορους εδαφικούς συνδυασμούς στο Phase² 8.0, οι οποίες υπολογίζονται από τον τύπο:

$$\text{Ολικές μετατοπίσεις} = \sqrt{X^2 + Y^2}$$

Σημειώνεται ότι οι ολικές μετατοπίσεις στην οροφή και το δάπεδο είναι ίσες με τις κατακόρυφες, καθώς οι οριζόντιες μετατοπίσεις είναι μηδενικές σε αυτά τα σημεία.

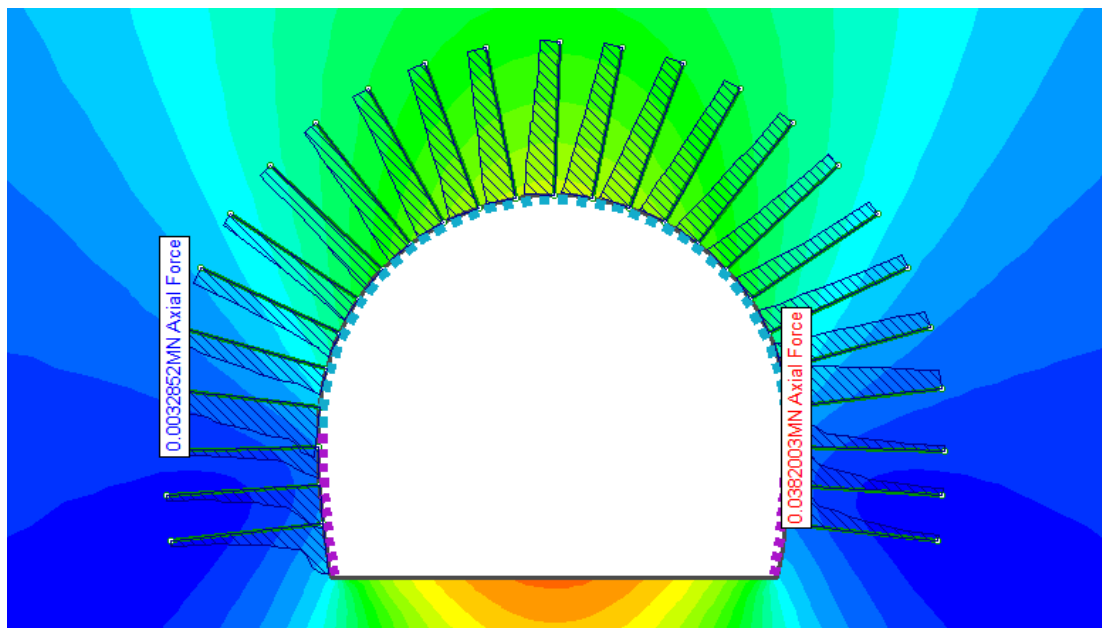
Πίνακας 9.8. Ολικές μετατοπίσεις σε οροφή, δάπεδο και τοιχώματα για όλες τις κατηγορίες

Phase ² 8.0	u (mm) οροφή	u (mm) δάπεδο	u (mm) τοιχώματα
Κατηγορία εδάφους I	7,20	9,13	1,58
Κατηγορία εδάφους II	14,6	20,1	3,9
Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα)	13,2	7,34	2,65
Κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα)	26,2	22,8	9,41
Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα υπο κλίση)	15,3	14,5	5,37
Κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα υπο κλίση)	30,9	19,7	11,4

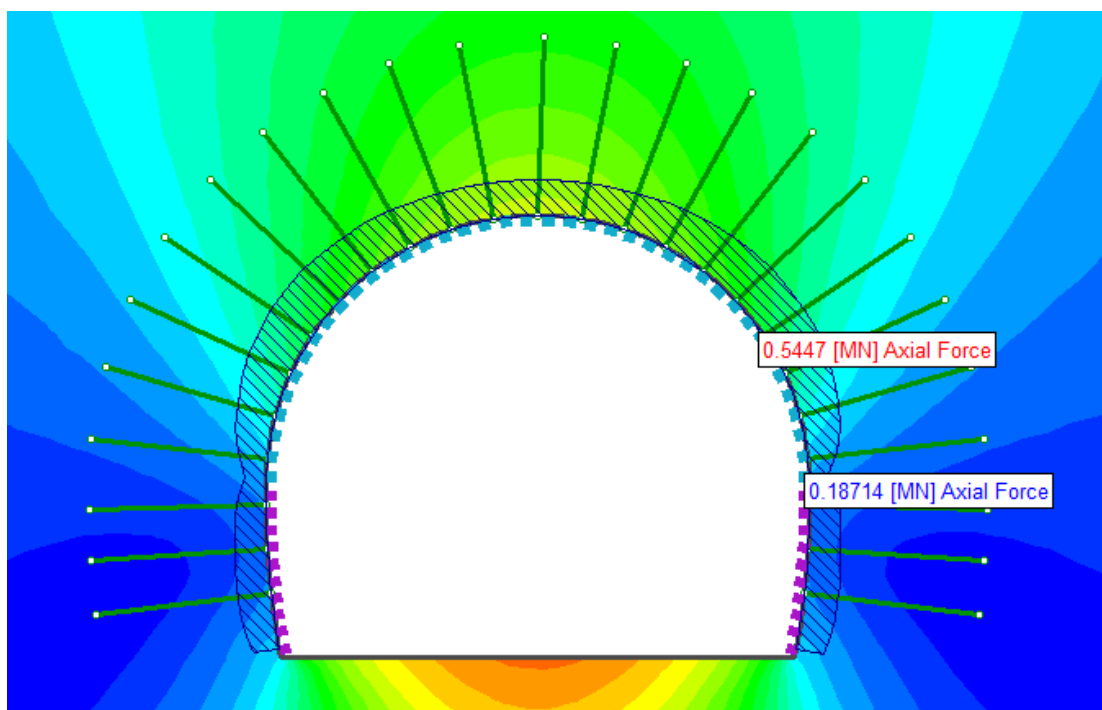
Καταπόνηση μέτρων άμεσης υποστήριξης

Παρακάτω παρουσιάζονται οι μέγιστες αξονικές δυνάμεις στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και στα αγκύρια για κάθε κατηγορία πετρώματος, καθώς και οι μέγιστες καμπτικές ροπές για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

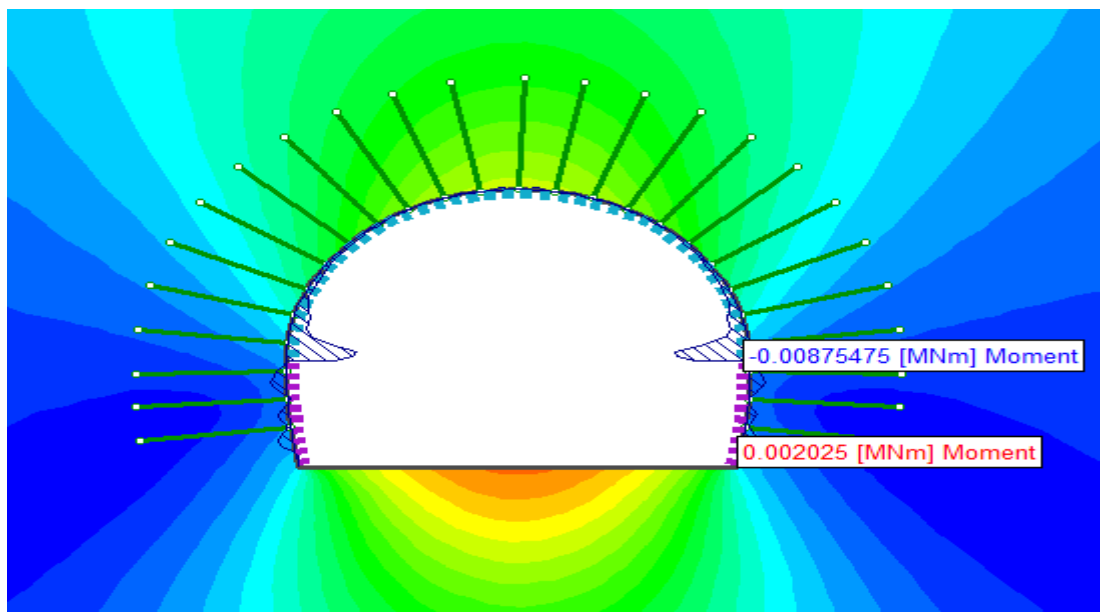
➤ Κατηγορία εδάφους Ι



Σχήμα 9.74. Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων (κατηγορία εδάφους Ι)



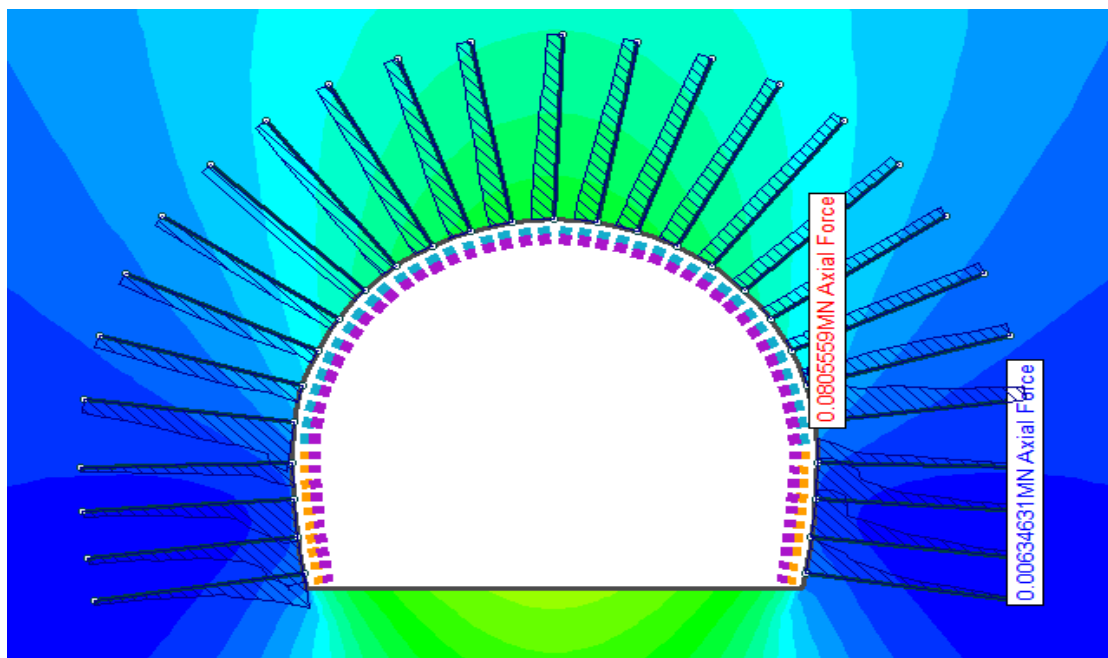
Σχήμα 9.75. Αξονικές δυνάμεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους Ι)



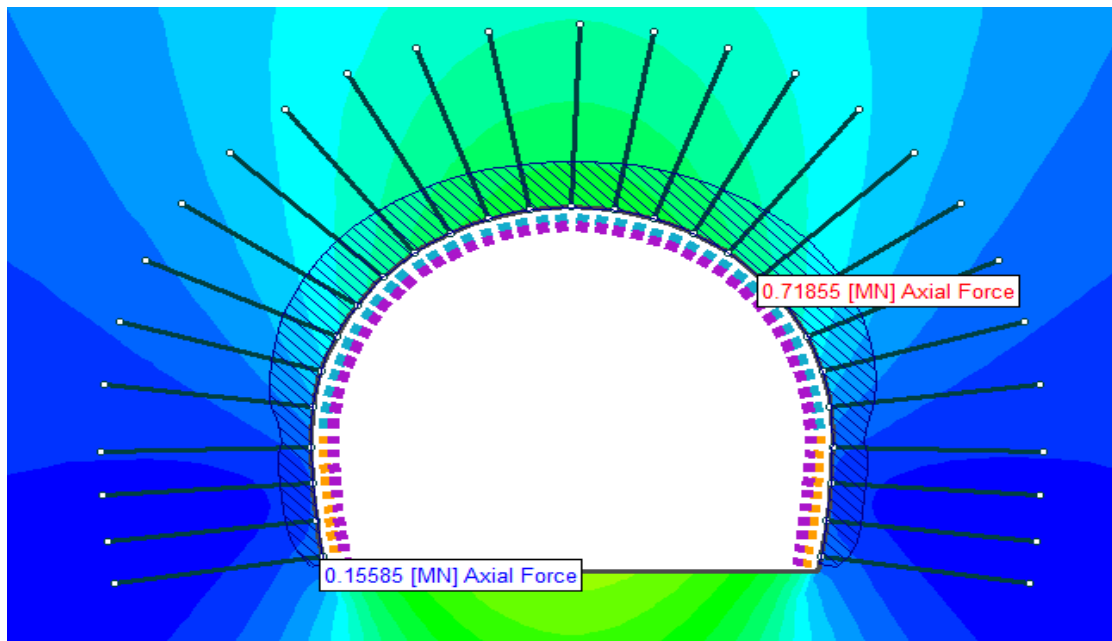
Σχήμα 9.76. Καμπτικές ροπές εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους I)

- Μέγιστη αξονική δύναμη αγκυρίων: 38 kN
- Μέγιστη αξονική δύναμη εκτοξευόμενου σκυροδέματος: 545 kN
- Μέγιστη καμπτική ροπή εκτοξευόμενου σκυροδέματος: 9 kNm

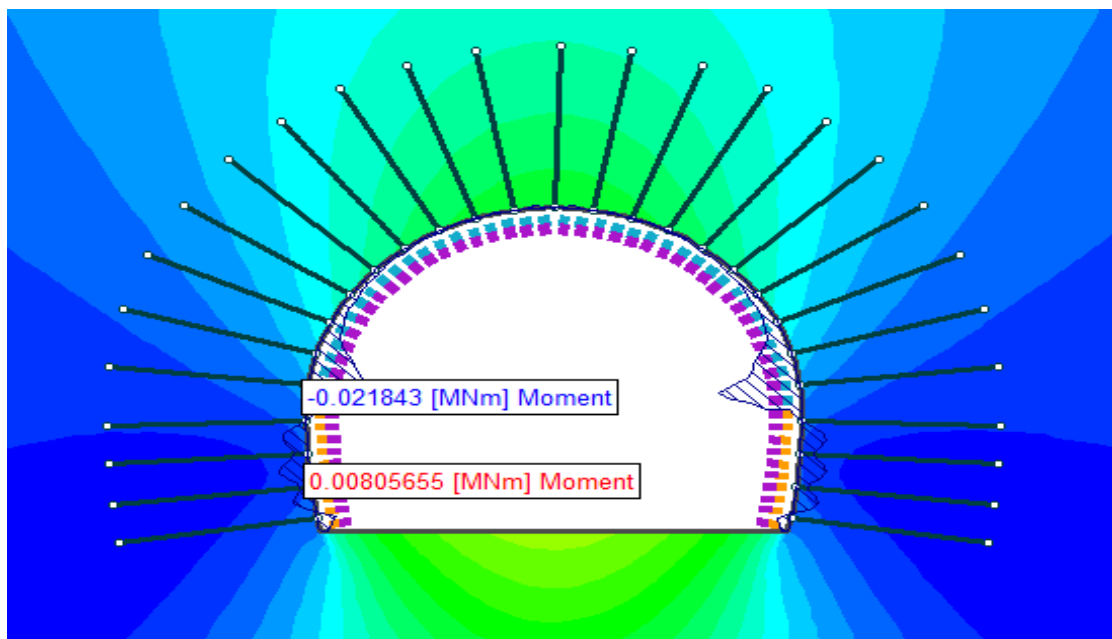
➤ **Κατηγορία εδάφους II**



Σχήμα 9.77. Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων (Κατηγορία εδάφους II)



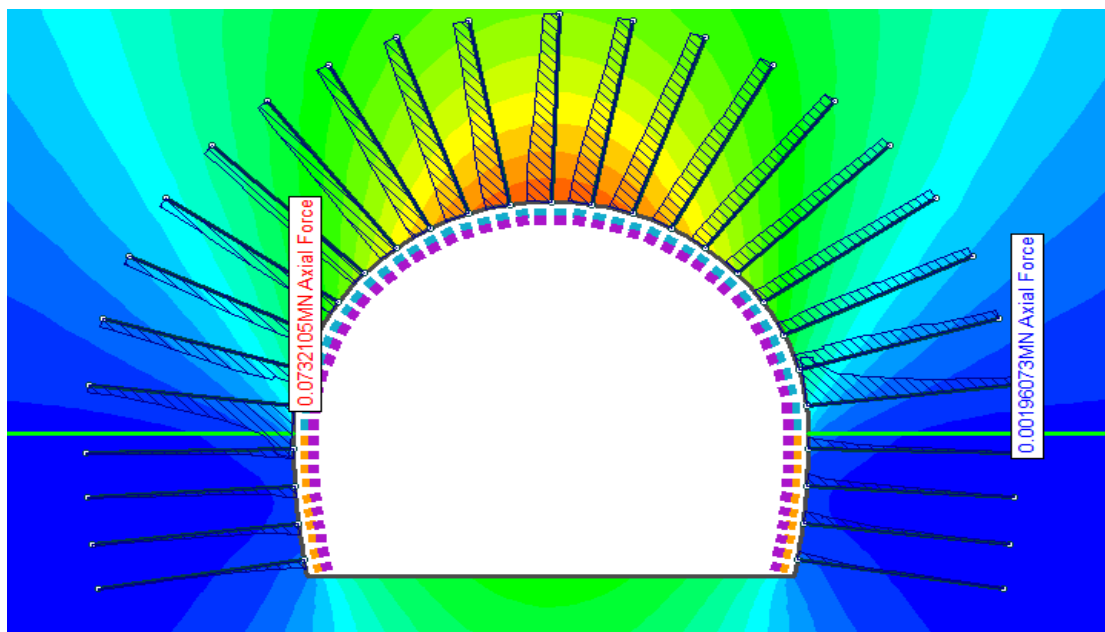
Σχήμα 9.78. Αξονικές δυνάμεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II)



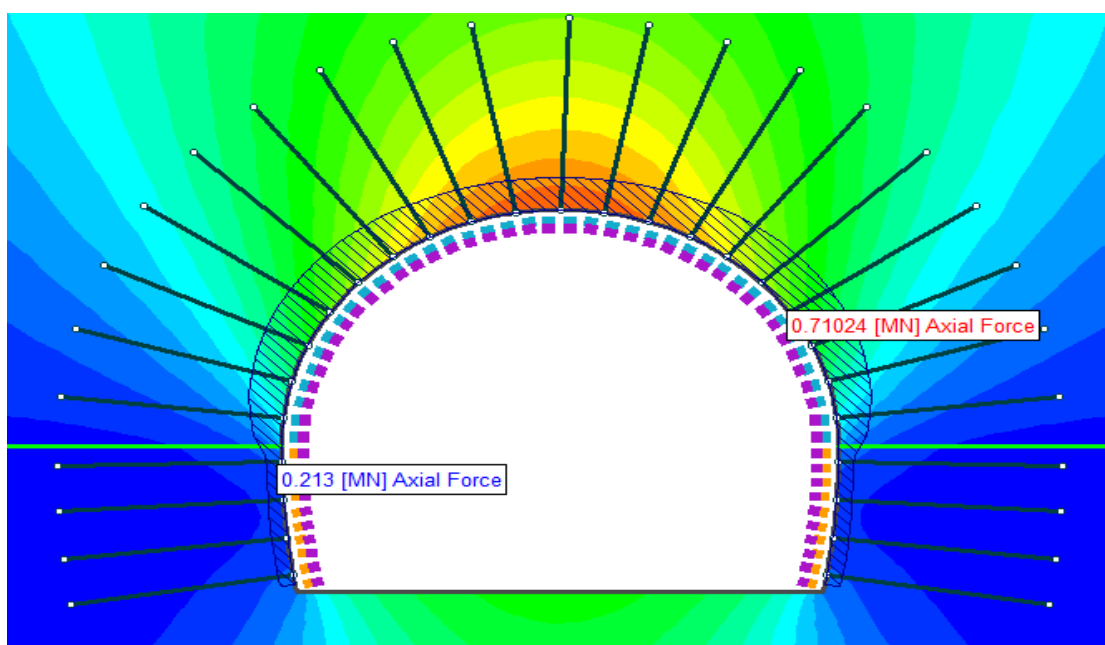
Σχήμα 9.79. Καμπτικές ροπές εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II)

- Μέγιστη αξονική δύναμη αγκυρίων: 80 kN
- Μέγιστη αξονική δύναμη εκτοξευόμενου σκυροδέματος: 718 kN
- Μέγιστη καμπτική ροπή εκτοξευόμενου σκυροδέματος: 22 kNm

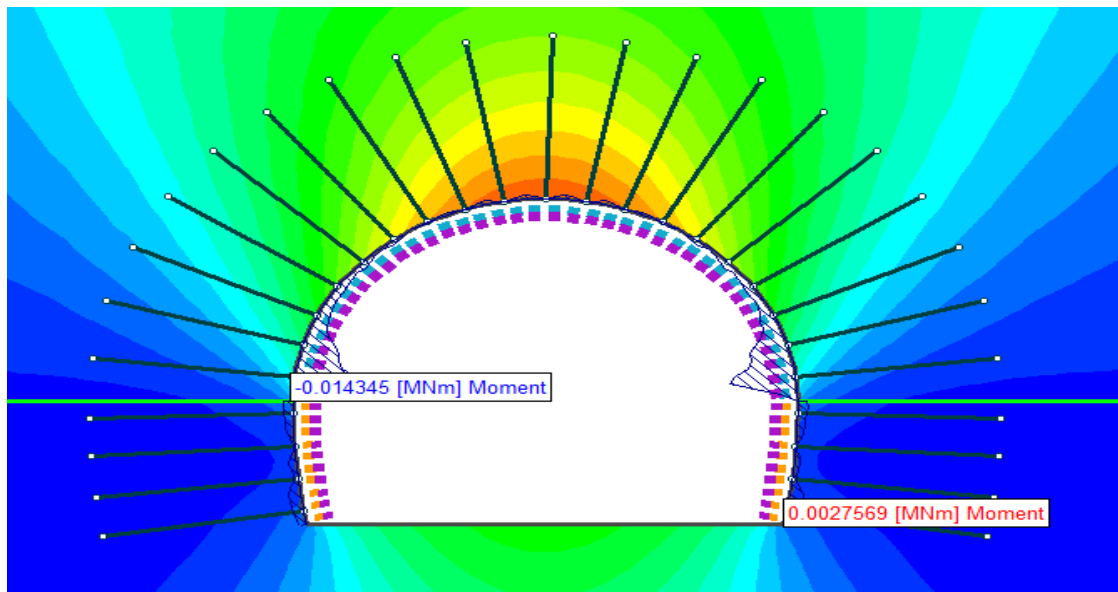
➤ Κατηγορία II εδάφους (2-στρώματα)



Σχήμα 9.80. Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα)



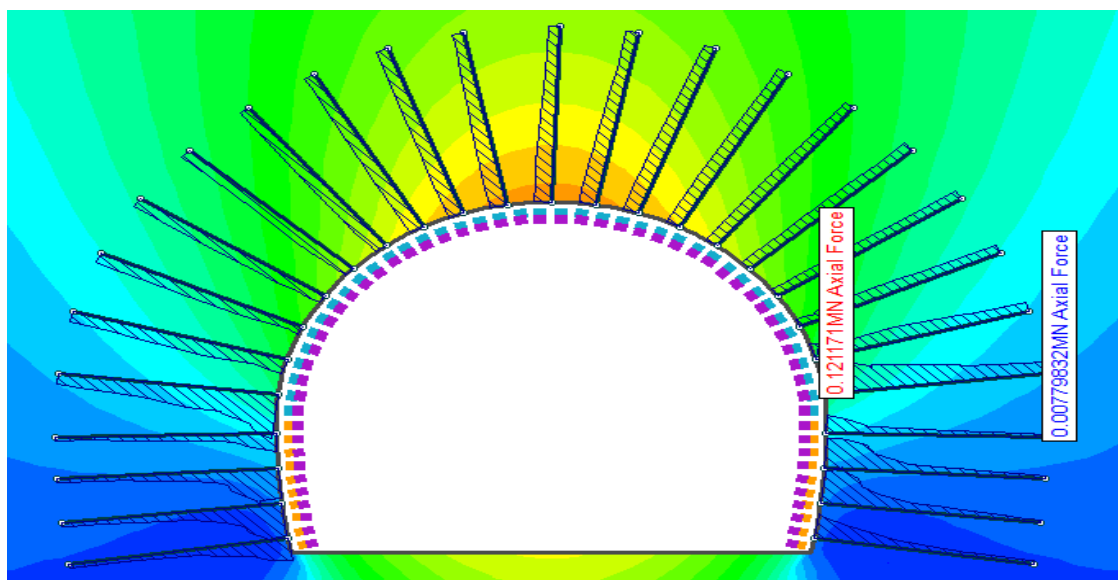
Σχήμα 9.81. Αξονικές δυνάμεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα)



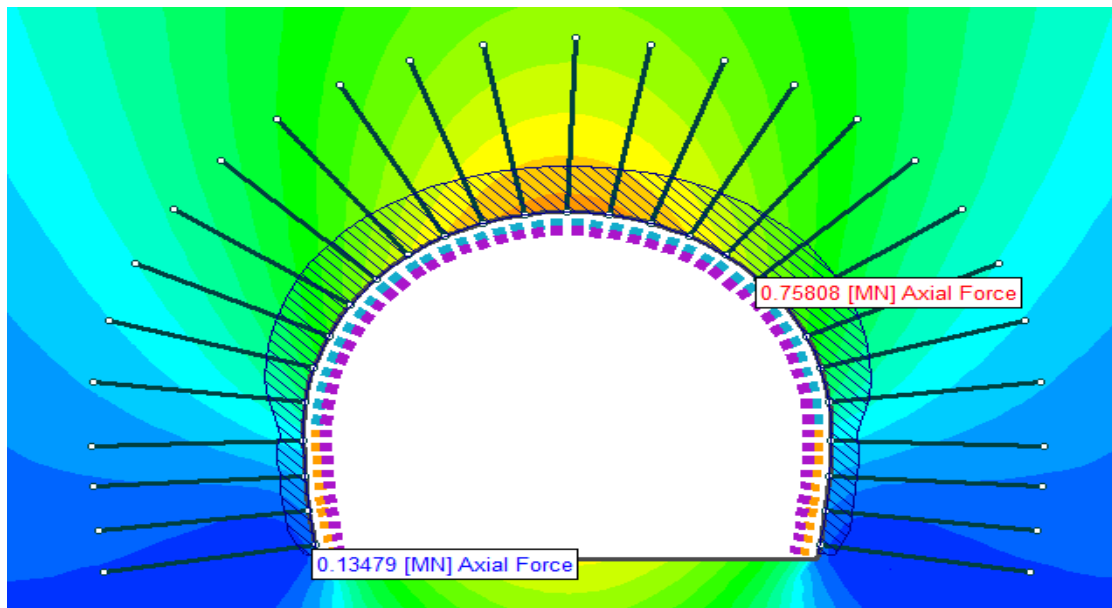
Σχήμα 9.82. Καμπτικές ροπές εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα)

- Μέγιστη αξονική δύναμη αγκυρίων: 73 kN
- Μέγιστη αξονική δύναμη εκτοξευόμενου σκυροδέματος: 710 kN
- Μέγιστη καμπτική ροπή εκτοξευόμενου σκυροδέματος: 14 kNm

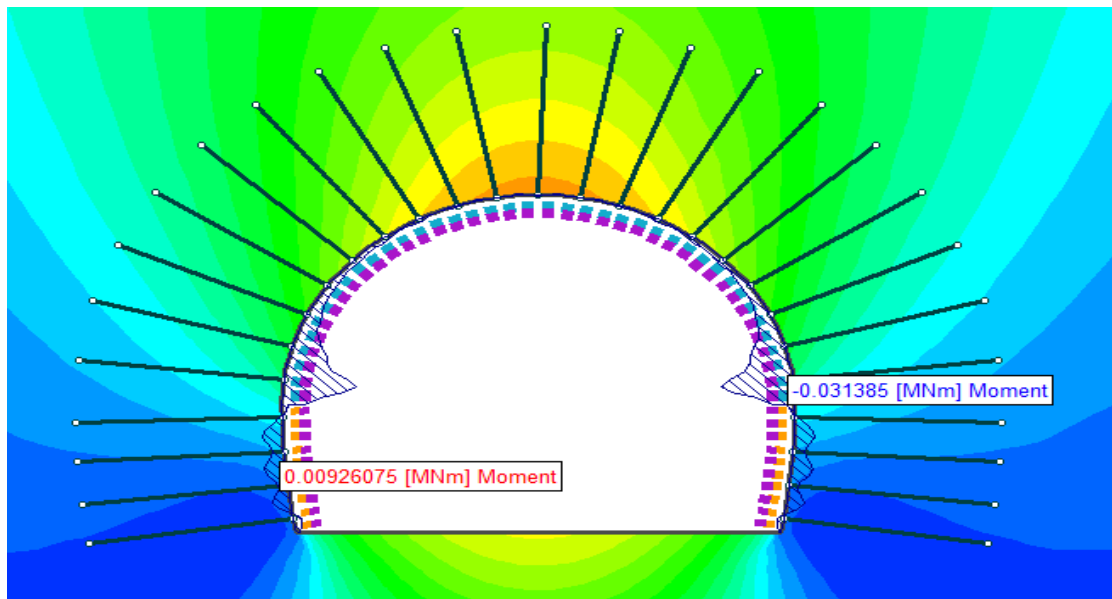
➤ **Κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα)**



Σχήμα 9.83. Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα)



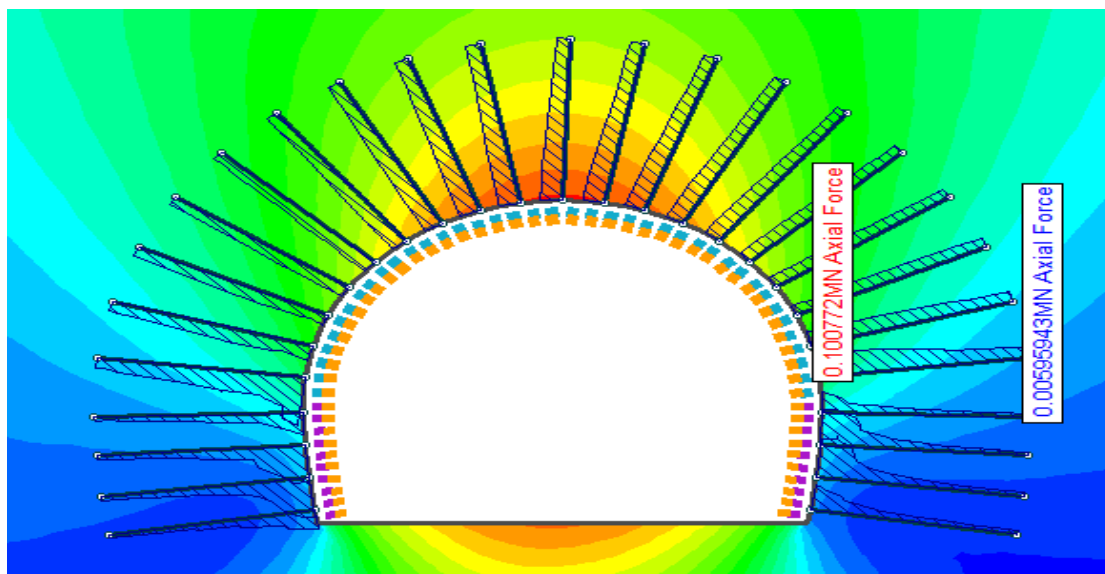
Σχήμα 9.84. Αξονικές δυνάμεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα)



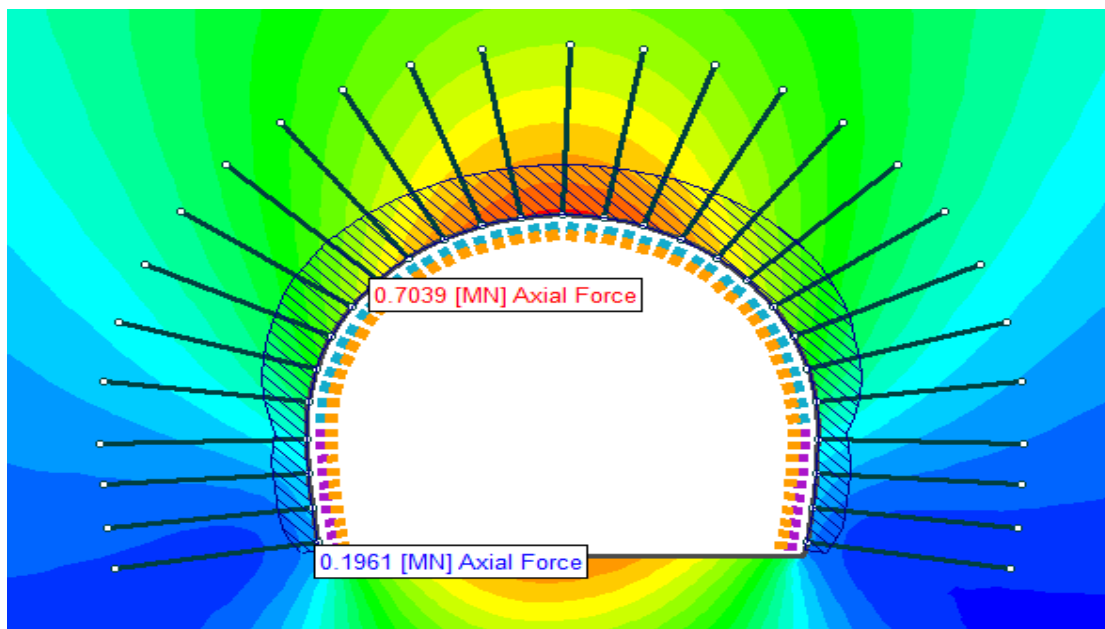
Σχήμα 9.85. Καμπτικές ροπές εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα)

- Μέγιστη αξονική δύναμη αγκυρίων: 121 kN
- Μέγιστη αξονική δύναμη εκτοξευόμενου σκυροδέματος: 758 kN
- Μέγιστη καμπτική ροπή εκτοξευόμενου σκυροδέματος: 31 kNm

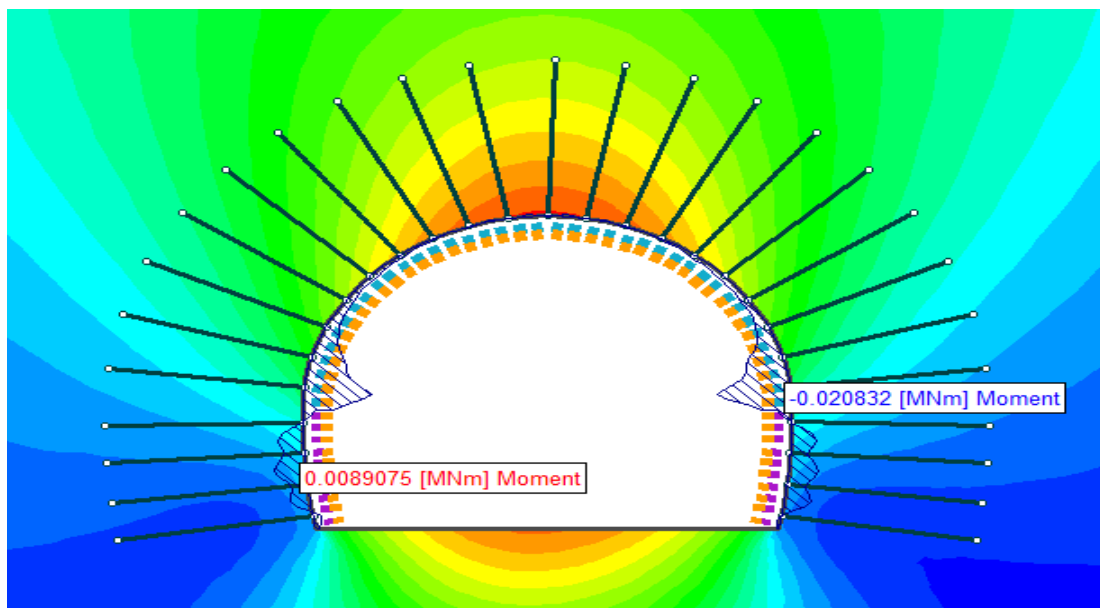
➤ Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα υπό κλίση)



Σχήμα 9.86. Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα υπο κλίση)



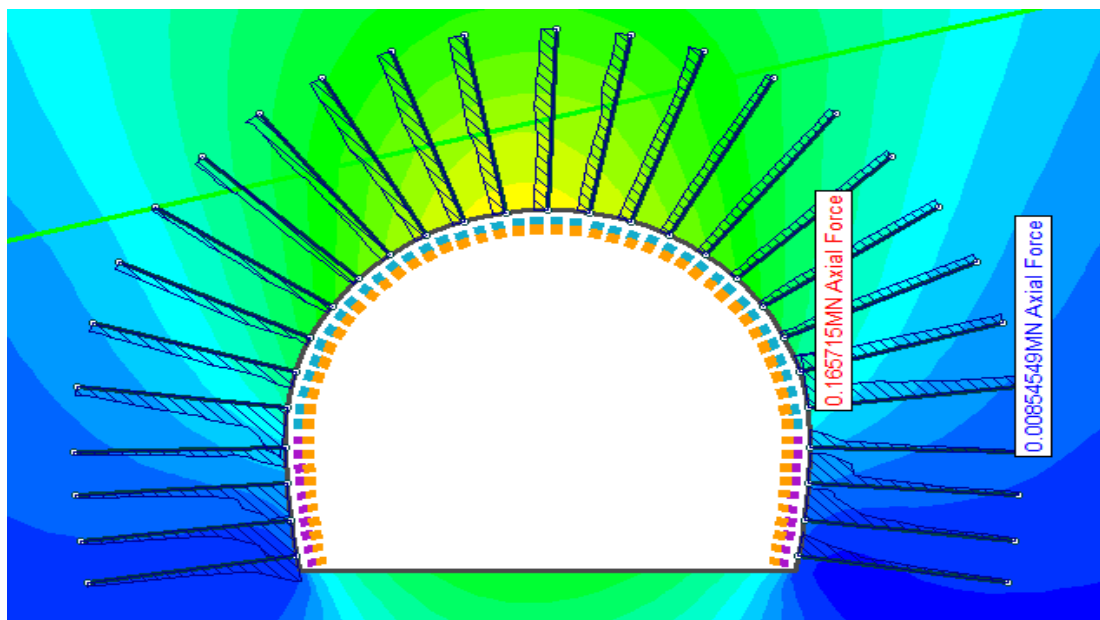
Σχήμα 9.87. Αξονικές δυνάμεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα υπό κλίση)



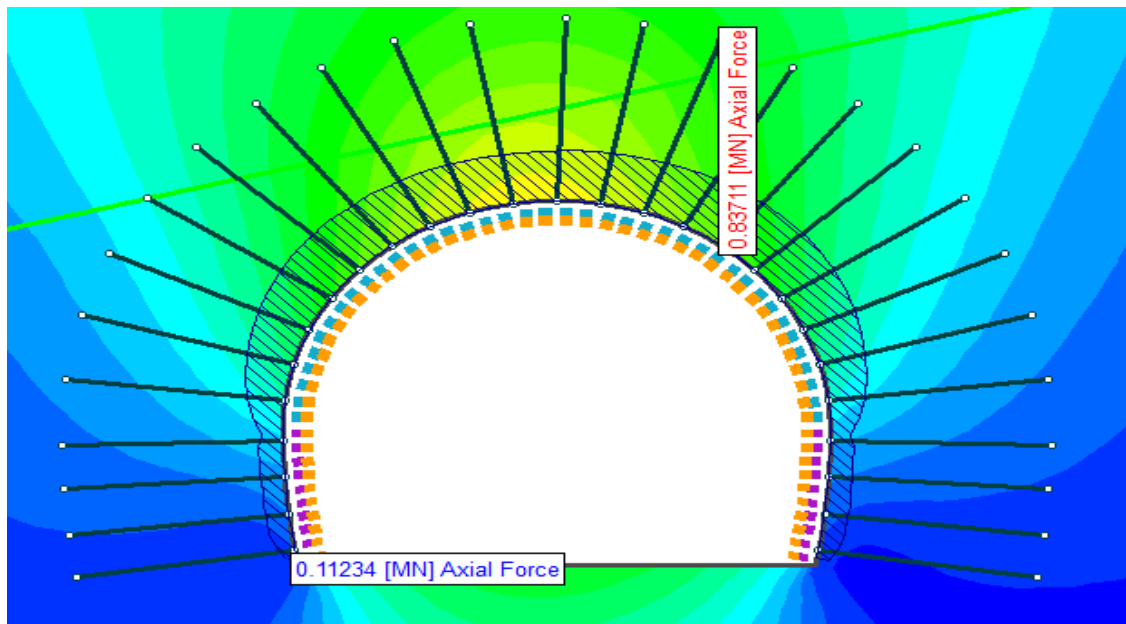
Σχήμα 9.88. Καμπτικές ροπές εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα υπό κλίση)

- Μέγιστη αξονική δύναμη αγκυρίων: 100 kN
- Μέγιστη αξονική δύναμη εκτοξευόμενου σκυροδέματος: 704 kN
- Μέγιστη καμπτική ροπή εκτοξευόμενου σκυροδέματος: 21 kNm

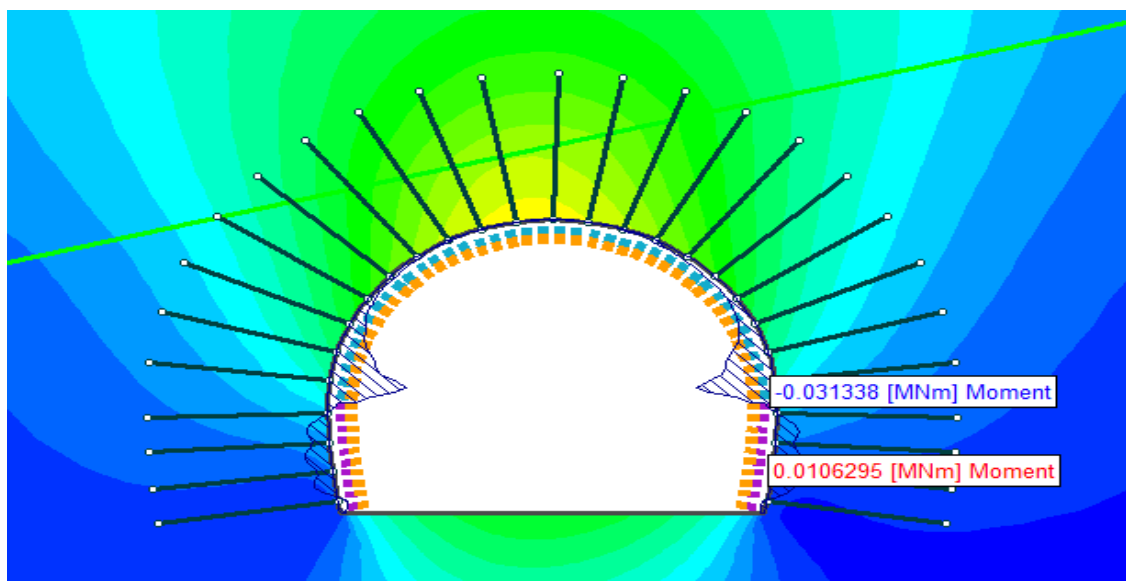
➤ **Κατηγορία II εδάφους (3-στρώματα υπό κλίση)**



Σχήμα 9.89. Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα υπο κλίση)



Σχήμα 9.90. Αξονικές δυνάμεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα υπό κλίση)



Σχήμα 9.91. Καμπτικές ροπές εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα υπό κλίση)

- Μέγιστη αξονική δύναμη αγκυρίων: 166 kN
- Μέγιστη αξονική δύναμη εκτοξευόμενου σκυροδέματος: 837 kN
- Μέγιστη καμπτική ροπή εκτοξευόμενου σκυροδέματος: 31 kNm

Και στην περίπτωση της ανάλυσης με το πρόγραμμα Phase² 8.0 οι μέγιστες αξονικές δυνάμεις των αγκυρίων εντοπίζονται στα αγκύρια που βρίσκονται στην παρειά της σήραγγας.

Παρακάτω παρουσιάζονται συγκεντρωμένα τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις των διαφόρων κατηγοριών βραχόμαζας για τις μέγιστες αξονικές δυνάμεις στα αγκύρια και στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, καθώς και οι μέγιστες καμπτικές ροπές του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

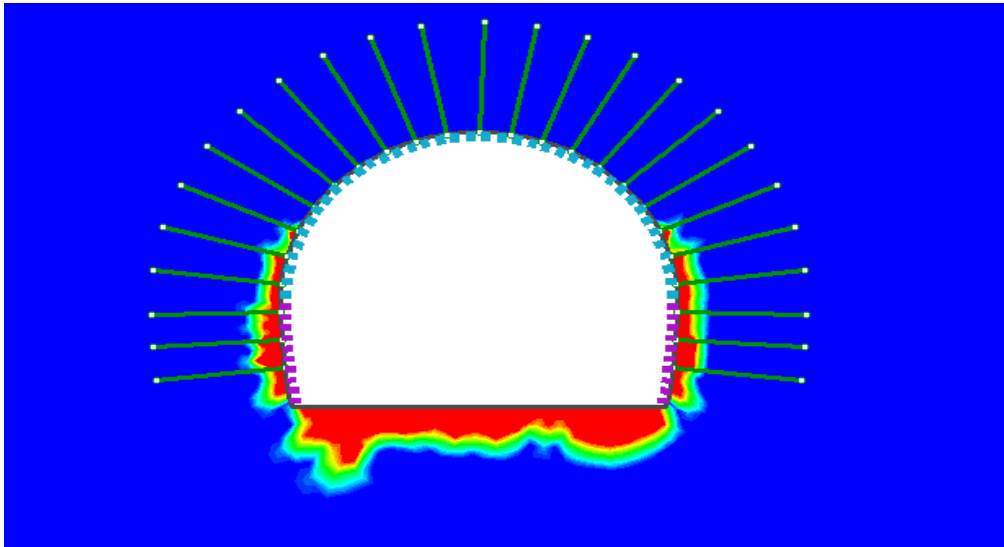
Πίνακας 9.9. Καταπονήσεις των μέτρων άμεσης υποστήριξης για όλες τις κατηγορίες

Phase ² 8.0	Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα		Αγκύρια
	Nmax (kN)	Mmax (kNm)	Nmax (kN)
Κατηγορία εδάφους I	544.7	8.7	38.2
Κατηγορία εδάφους II	718.6	21.8	80.06
Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα)	710.2	14.3	73.2
Κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα)	758.1	31.4	121.2
Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα υπο κλίση)	703.9	20.8	100.8
Κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα υπο κλίση)	837.1	31.3	165.7

Πλαστικοποιημένες περιοχές

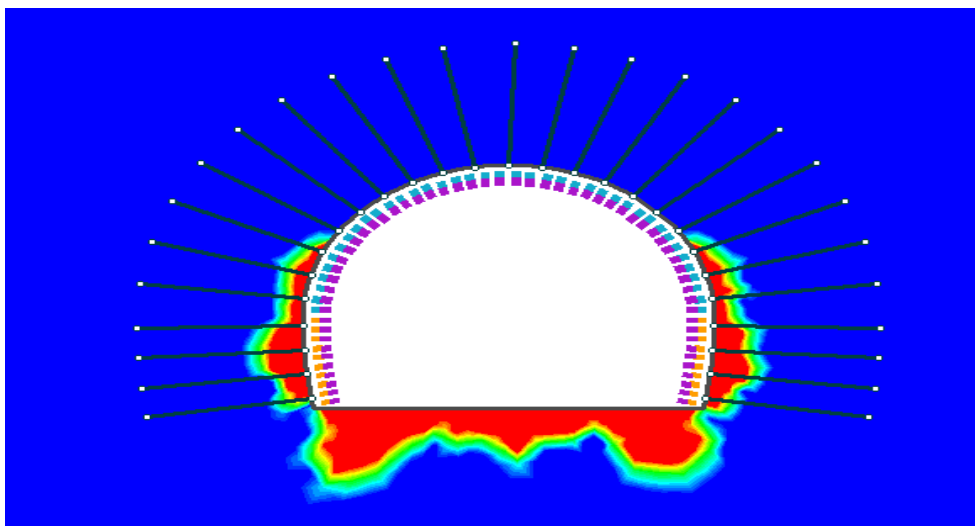
Στα σχήματα φαίνονται οι πλαστικές παραμορφώσεις για κάθε κατηγορία πετρώματος, όπως αναπτύχθηκαν περιμετρικά της κατασκευής μετά την εφαρμογή των μέτρων άμεσης υποστήριξης.

➤ Κατηγορία εδάφους I



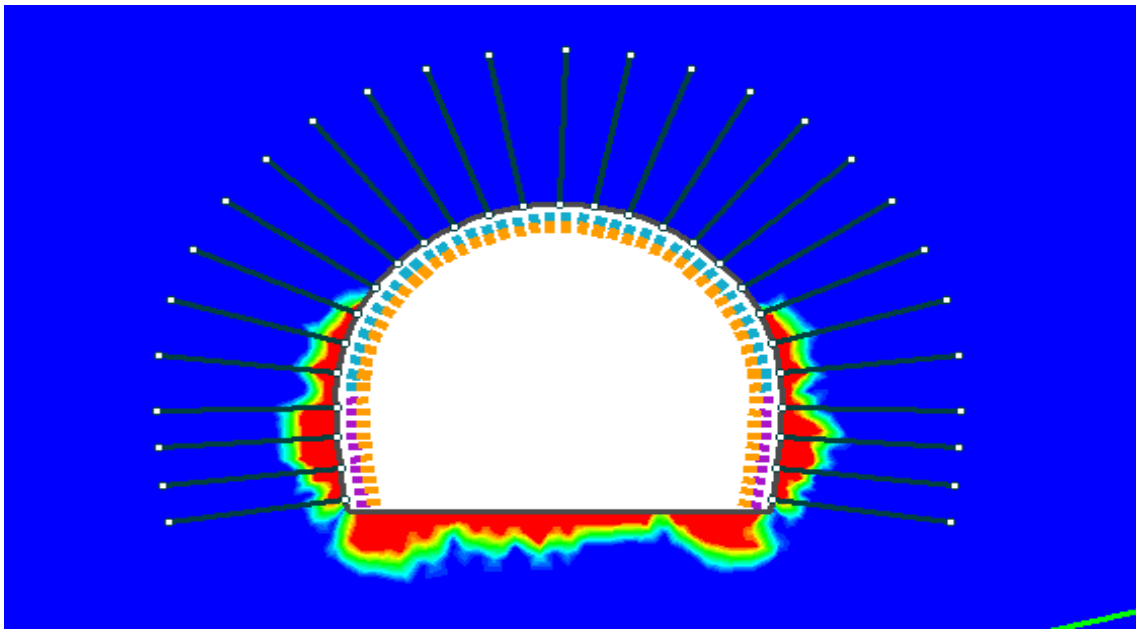
Σχήμα 9.92. Ζώνη πλαστικοποίησης μετά την εφαρμογή των μέτρων άμεσης υποστήριξης (Κατηγορία εδάφους I)

➤ Κατηγορία II



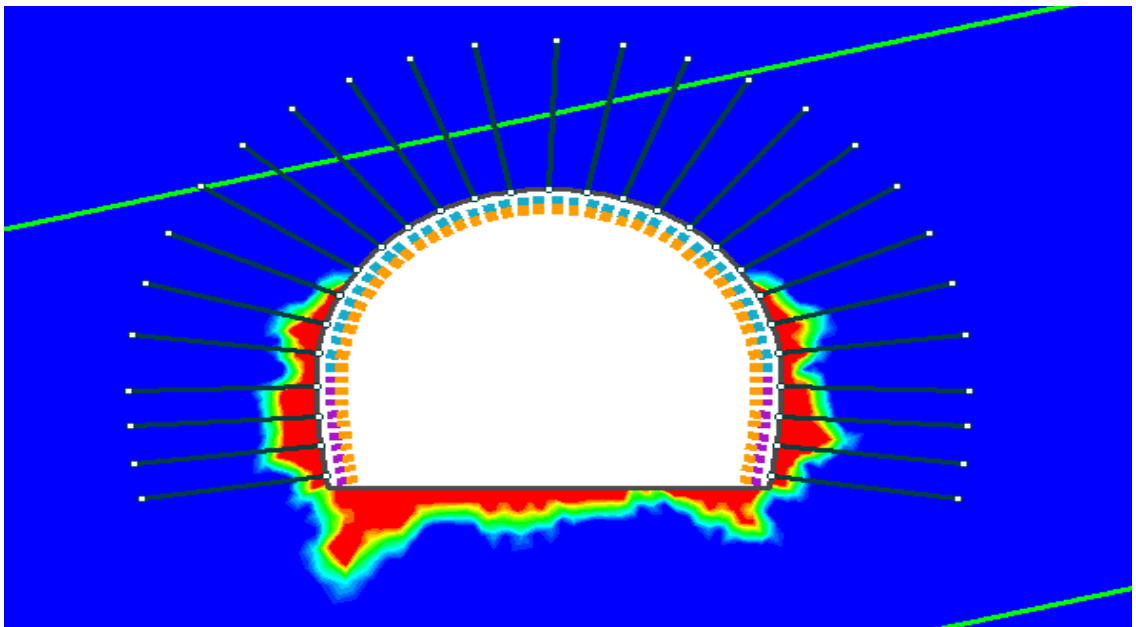
Σχήμα 9.93. Ζώνη πλαστικοποίησης μετά την εφαρμογή των μέτρων άμεσης υποστήριξης (Κατηγορία εδάφους II)

➤ Κατηγορία II (2-στρώματα υπό κλίση)



Σχήμα 9.96. Ζώνη πλαστικοποίησης μετά την εφαρμογή των μέτρων άμεσης υποστήριξης (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα υπό κλίση)

➤ Κατηγορία II (3-στρώματα υπό κλίση)



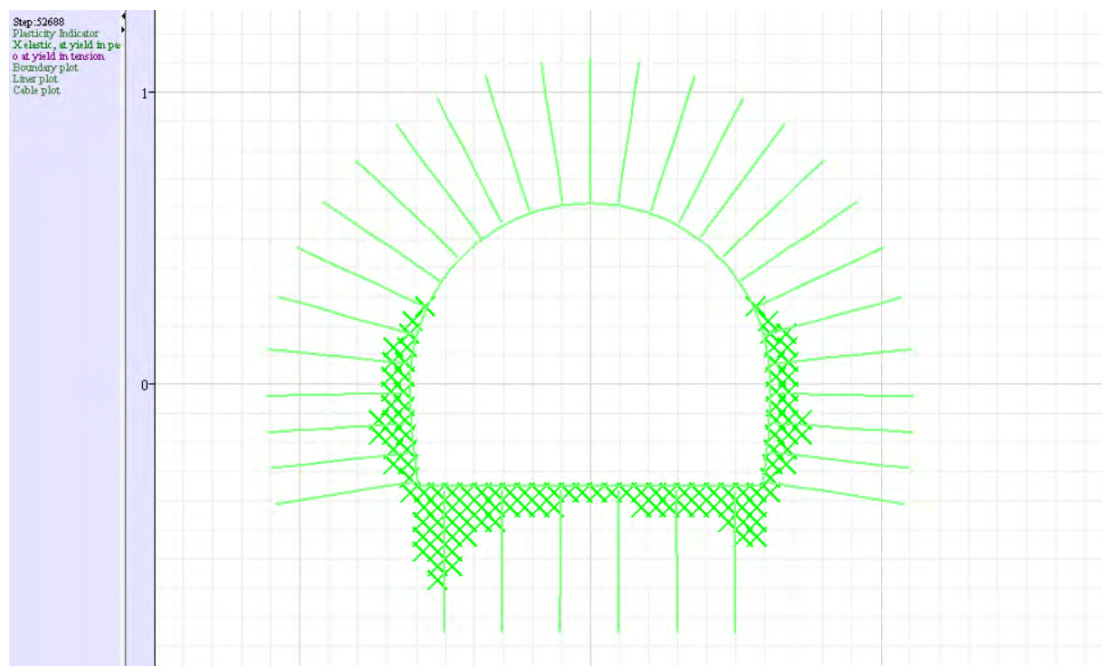
Σχήμα 9.97. Ζώνη πλαστικοποίησης μετά την εφαρμογή των μέτρων άμεσης υποστήριξης (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα υπό κλίση)

9.4 Παραμετρική διερεύνηση με τοποθέτηση μέτρων υποστήριξης στο δάπεδο για κατηγορία εδάφους II

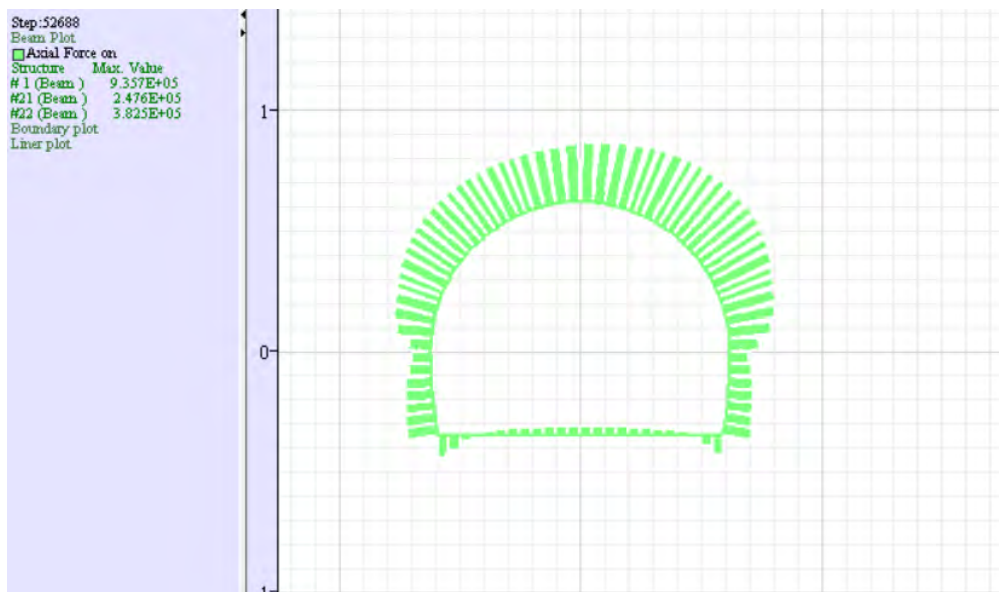
Σε αυτήν την παράγραφο μελετήθηκε η ευστάθεια της σήραγγας με τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος και αγκυρίων στο δάπεδο. Επιλέχθηκε η διατομή σήραγγας για κατηγορία II με 3-στρώματα υπό κλίση, εφόσον σε αυτήν παρατηρήθηκαν οι μεγαλύτερες συγκλίσεις.

Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις στα δύο προγράμματα.

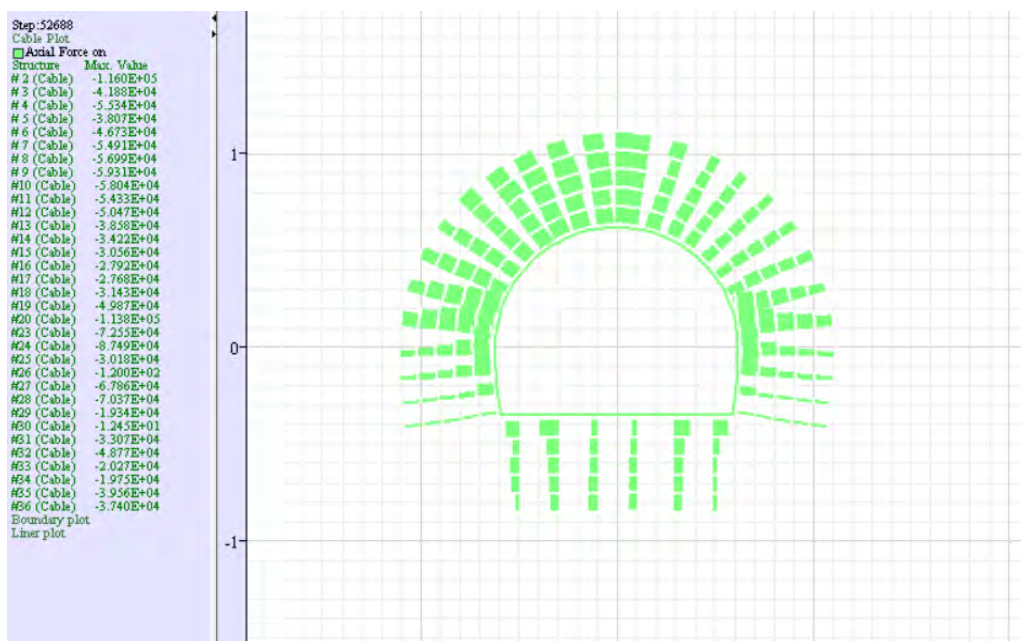
9.4.1 Αποτελέσματα με χρήση του προγράμματος Flac 7.0



Σχήμα 9.98. Ζώνη πλαστικοποίησης μετά την εφαρμογή των μέτρων υποστήριξης στο δάπεδο



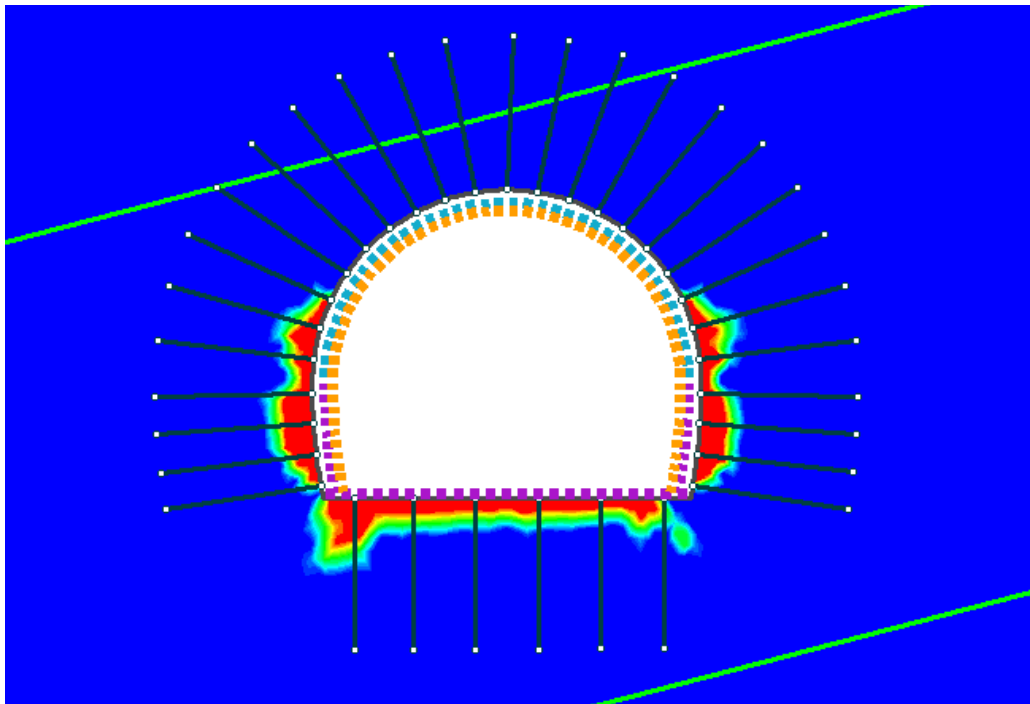
Σχήμα 9.99. Αξονικές δυνάμεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος



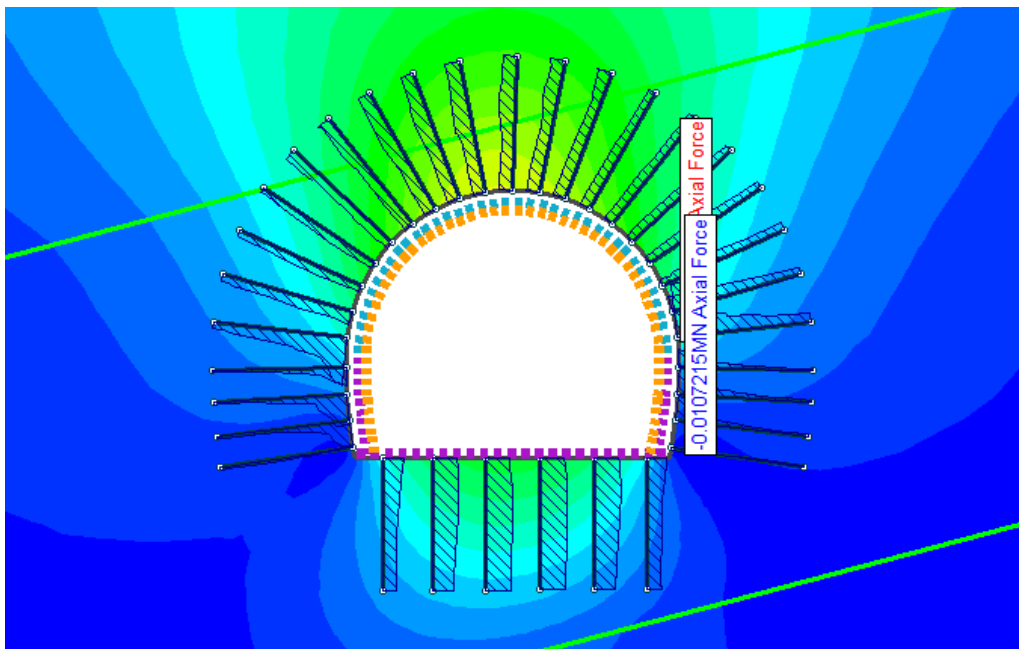
Σχήμα 9.100. Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων

- Κατακόρυφη μετατόπιση: στην οροφή -31,3 mm, στο δάπεδο 19,65 mm και στα τοιχώματα 12,03 mm
- Οριζόντια μετατόπιση στα τοιχώματα ίση με 3,7 mm
- Μέγιστη αξονική δύναμη στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα 935,7 kN και εντοπίζεται στη δεξιά παρειά της άνω ημιδιατομής
- Μέγιστη αξονική δύναμη στα αγκύρια 116 kN και εντοπίζεται στην αριστερή παρειά της άνω ημιδιατομής

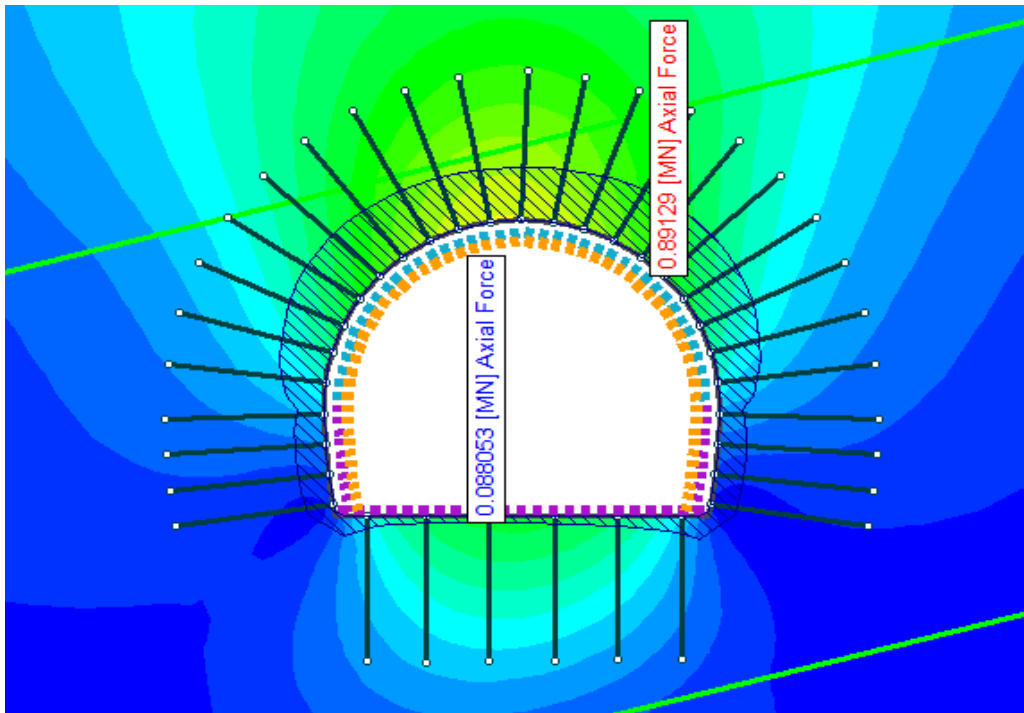
9.4.2 Αποτελέσματα με χρήση του προγράμματος Phase² 8.0



Σχήμα 9.101. Ζώνη πλαστικοποίησης μετά την εφαρμογή των μέτρων υποστήριξης στο δάπεδο



Σχήμα 9.102. Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων



Σχήμα 9.103. Αξονικές δυνάμεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος

- Κατακόρυφη μετατόπιση: στην οροφή -30,1 mm, στο δάπεδο 19 mm και στα τοιχώματα 10,4 mm
- Οριζόντια μετατόπιση στα τοιχώματα ίση με 3,73 mm
- Μέγιστη αξονική δύναμη στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα 891,3 kN
- Μέγιστη αξονική δύναμη στα αγκύρια 171 kN

Παρατηρείται ότι μετά την εφαρμογή των μέτρων υποστήριξης στο δάπεδο, οι τιμές των κατακόρυφων μετατοπίσεων και των αξονικών δυνάμεων των αγκυρίων και του εκτοξευόμενου σκυροδέματος δεν διαφοροποιούνται. Παρουσιάζεται μικρή μείωση της ζώνης πλαστικοποίησης στο δάπεδο και στις παρειές.

9.5 Αποτελέσματα προσομοίωσης δίδυμης σήραγγας

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα παρακάτω αποτελέσματα όπως προέκυψαν από την προσομοίωση διάνοιξης δίδυμης σήραγγας με τοποθέτηση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης:

- Κατακόρυφες μετατοπίσεις,
- Οριζόντιες μετατοπίσεις,
- Ολικές,
- Πλαστικοποιημένες περιοχές,
- Καταπόνηση των μέτρων άμεσης υποστήριξης.

9.5.1 Αποτελέσματα με χρήση του προγράμματος Flac 7.0

Κατακόρυφες Μετατοπίσεις

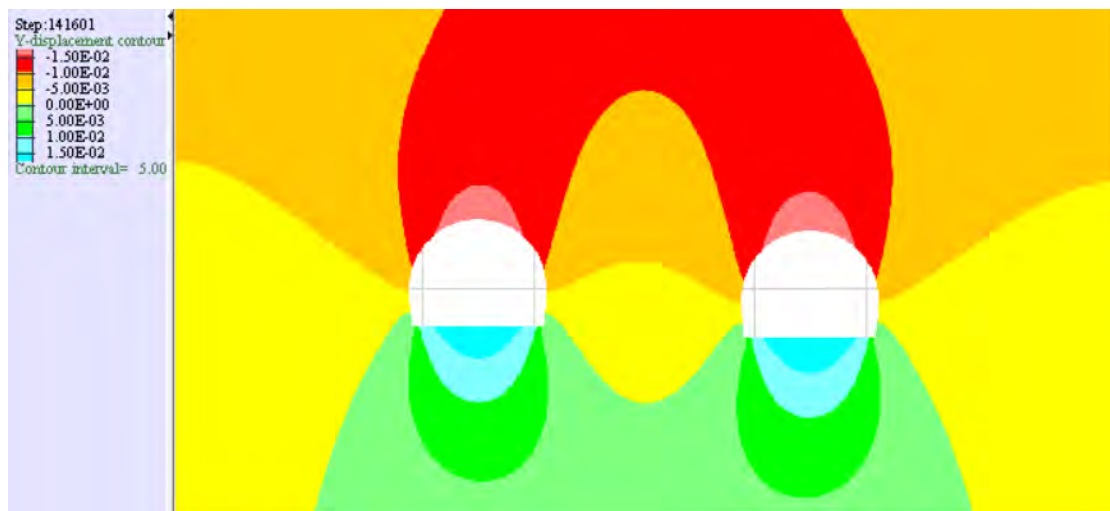
Παρακάτω παρουσιάζονται οι κατακόρυφες συγκλίσεις όπως προέκυψαν για κάθε κατηγορία εδάφους. Οι μετατοπίσεις μετρήθηκαν στην οροφή, στο δάπεδο και στις παρειές κάθε κλάδου.

➤ Κατηγορία εδάφους I



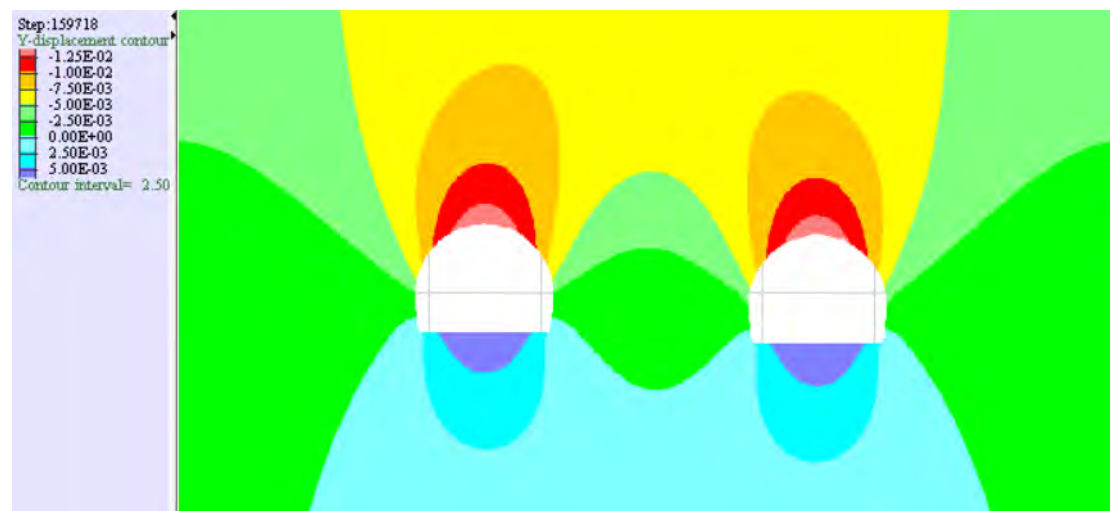
Σχήμα 9.104. Κατακόρυφες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους I)

➤ **Κατηγορία εδάφους II**



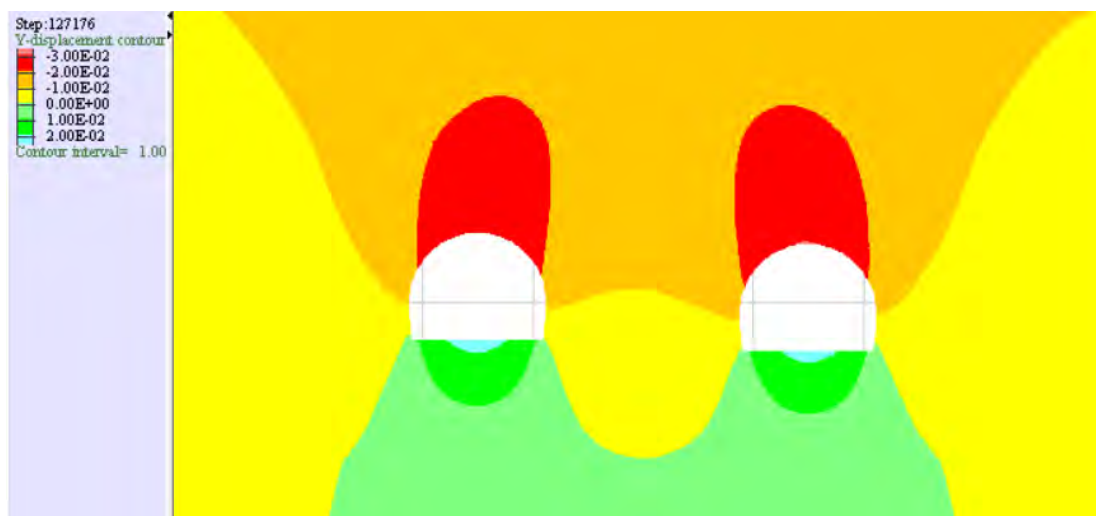
Σχήμα 9.105. Κατακόρυφες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II)

➤ **Κατηγορία εδάφους II(2-στρώματα)**



Σχήμα 9.106. Κατακόρυφες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα)

➤ **Κατηγορία εδάφους II(3-στρώματα)**



Σχήμα 9.107. Κατακόρυφες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα)

Πίνακας 9.10. Συγκλίσεις οροφής, δαπέδου και τοιχωμάτων για όλες τις κατηγορίες

FLAC 7.0	Αριστερός κλάδος				Δεξιός κλάδος			
	u _y (mm) οροφή	u _y (mm) δάπεδο	u _y (mm) αριστερή παρειά	u _y (mm) δεξιά παρειά	u _y (mm) οροφή	u _y (mm) δάπεδο	u _y (mm) αριστερή παρειά	u _y (mm) δεξιά παρειά
Κατηγορία εδάφους I	-8,53	8,58	-2,04	-2,12	-8,7	8,81	-2,09	-2,02
Κατηγορία εδάφους II	-17,83	1,9	-5,89	-6,11	-18,28	19,55	-6,06	-5,88
Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα)	-14,28	6,94	-2,5	-2,6	-14,26	7,08	-2,62	-2,5
Κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα)	-30,03	22,35	-11,45	-13,12	-30,36	22,1	-13,12	-11,5

Οριζόντιες Μετατοπίσεις

Παρακάτω παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετατοπίσεις που προκλήθηκαν στα τοιχώματα κάθε κλάδου της σήραγγας. Σημειώνεται ότι οι οριζόντιες μετακινήσεις στην οροφή και στο δάπεδο της κατασκευής είναι μηδενικές.

Πίνακας 9.11. Οριζόντιες μετατοπίσεις για όλες τις κατηγορίες

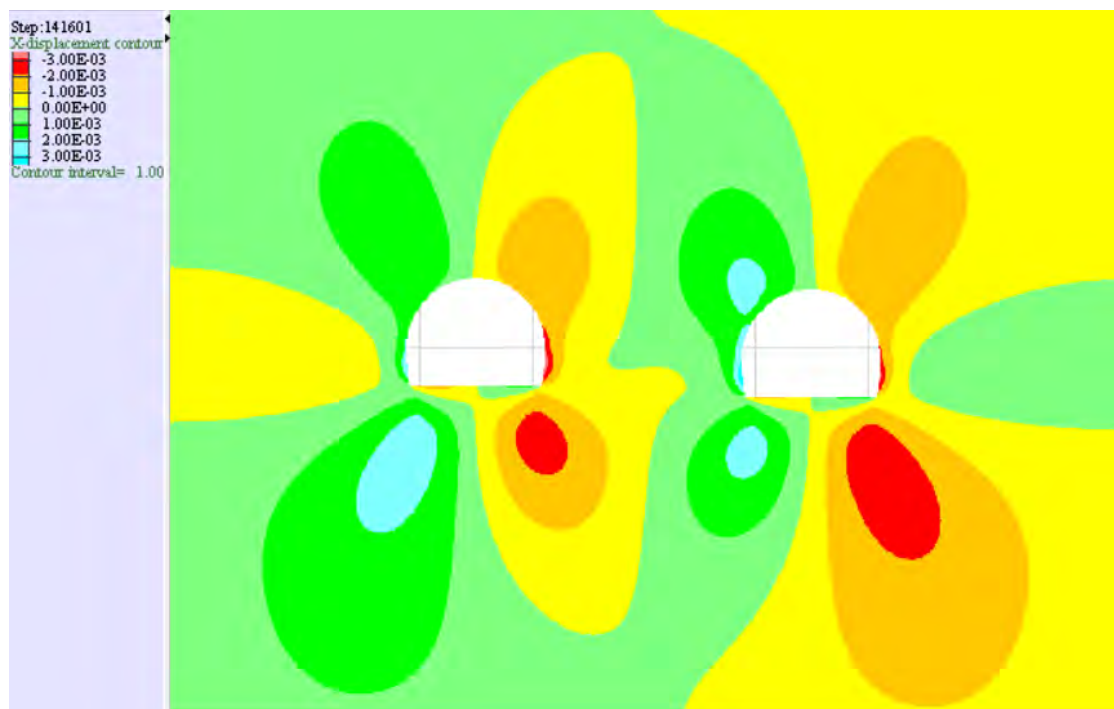
FLAC 7.0	Αριστερός κλάδος		Δεξιός κλάδος	
	u_x (mm) αριστερή παρειά	u_x (mm) δεξιά παρειά	u_x (mm) αριστερή παρειά	u_x (mm) δεξιά παρειά
Κατηγορία εδάφους I	1,15	-1,37	1,43	-1,21
Κατηγορία εδάφους II	2,18	-2,75	2,96	-2,34
Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα)	1,35	-1,58	1,33	-1,01
Κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα)	3,23	-3,95	4,52	-3,62

➤ Κατηγορία εδάφους I



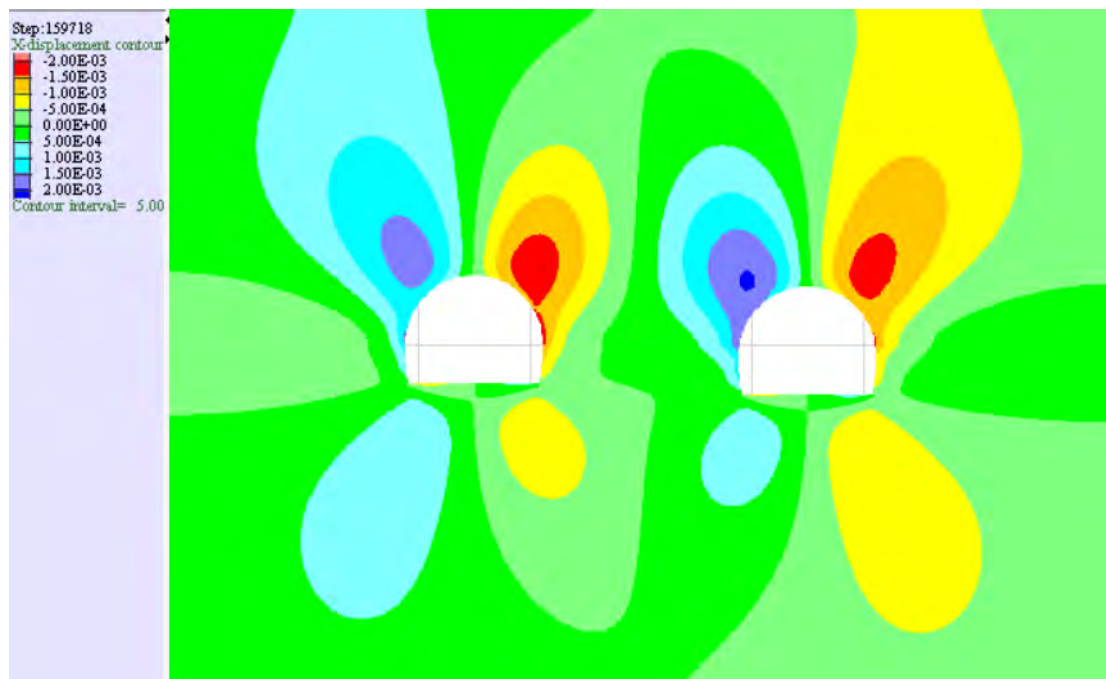
Σχήμα 9.108. Οριζόντιες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους I)

➤ **Κατηγορία εδάφους II**



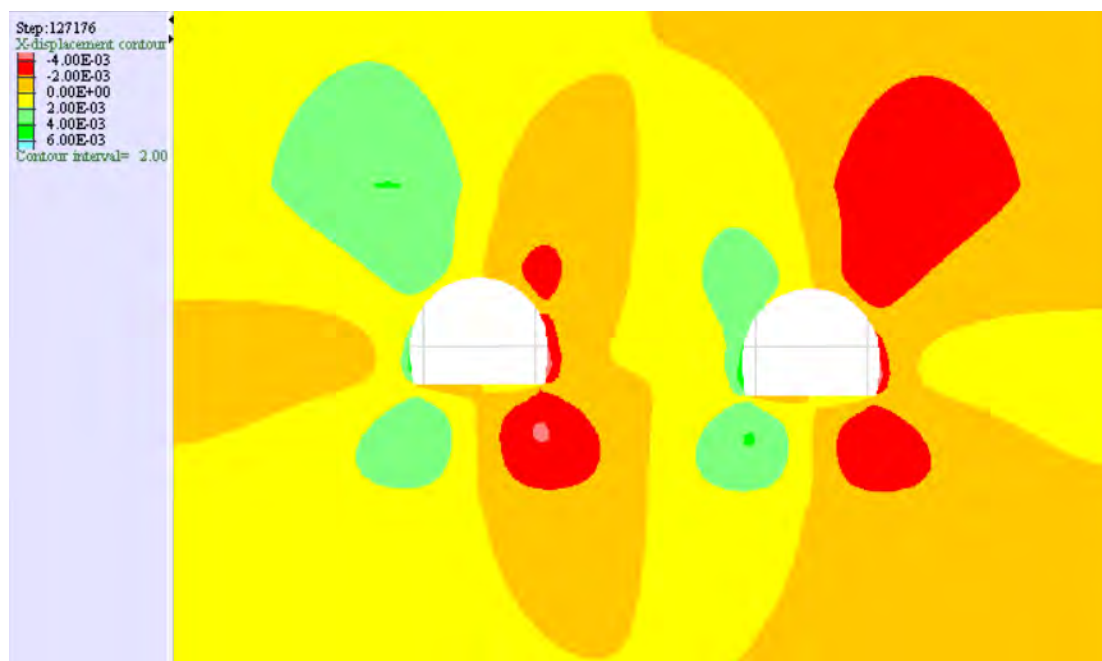
Σχήμα 9.109. Οριζόντιες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II)

➤ **Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα)**



Σχήμα 9.110. Οριζόντιες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα)

➤ **Κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα)**



Σχήμα 9.111. Οριζόντιες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα)

Ολικές Μετατοπίσεις

Οι μέγιστες μετατοπίσεις στην επιφάνεια του εδάφους εμφανίζονται στην μέση της αξονική απόστασης των διατομών των σηράγγων. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές που προέκυψαν για κάθε εδαφικό σχηματισμό.

Πίνακας 9.12. Μέγιστες μετατοπίσεις στην επιφάνεια του εδάφους

(FLAC)	Displacement at ground surface (mm)
Κατηγορία εδάφους I	1,5
Κατηγορία εδάφους II	3,2
Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα)	2,7
Κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα)	6.8

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται οι συγκλίσεις στις οροφές των σήραγγων, όπως προκύπτουν κατά τα στάδια εκσκαφής και υποστήριξης των δύο κλάδων. Όπως έχει αναφερθεί στην Ενότητα 9.6 η διάνοιξη της δίδυμης σήραγγας γίνεται σε δύο φάσεις για κάθε κλάδο.

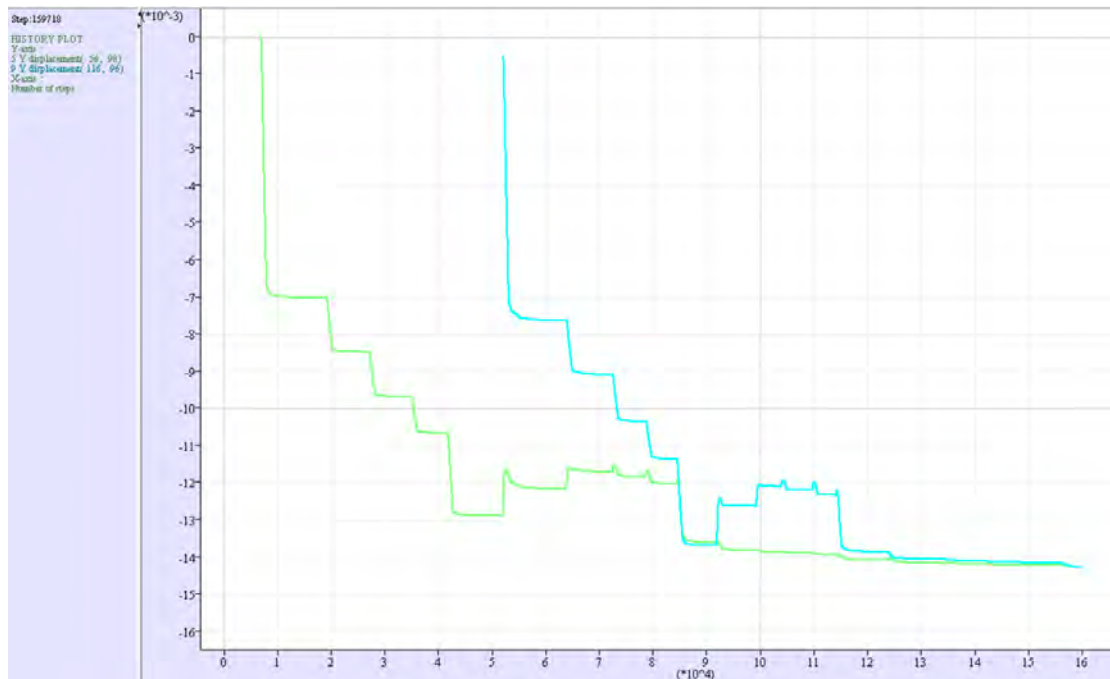
Πίνακας 9.13. Ολικές μετατοπίσεις στην οροφή της σήραγγας

Α' Φάση εκσκαφής (άνω ημιδιατομή)			
Ολικές μετατοπίσεις στην οροφή της σήραγγας (mm)	Αριστερού κλάδου μετά την εκσκαφή - υποστήριξη της άνω ημιδιατομής	Αριστερού κλάδου μετά την εκσκαφή - υποστήριξη της δεξιά άνω ημιδιατομής	Δεξιού κλάδου μετά την εκσκαφή - υποστήριξη της άνω ημιδιατομής
Κατηγορία εδάφους I	7,06	7,86	8,02
Κατηγορία εδάφους II	14,72	16,38	16,79
Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα)	12,89	13,59	13,69
Κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα)	25,35	27,28	27,58

Πίνακας 9.14. Ολικές μετατοπίσεις στην οροφή της σήραγγας

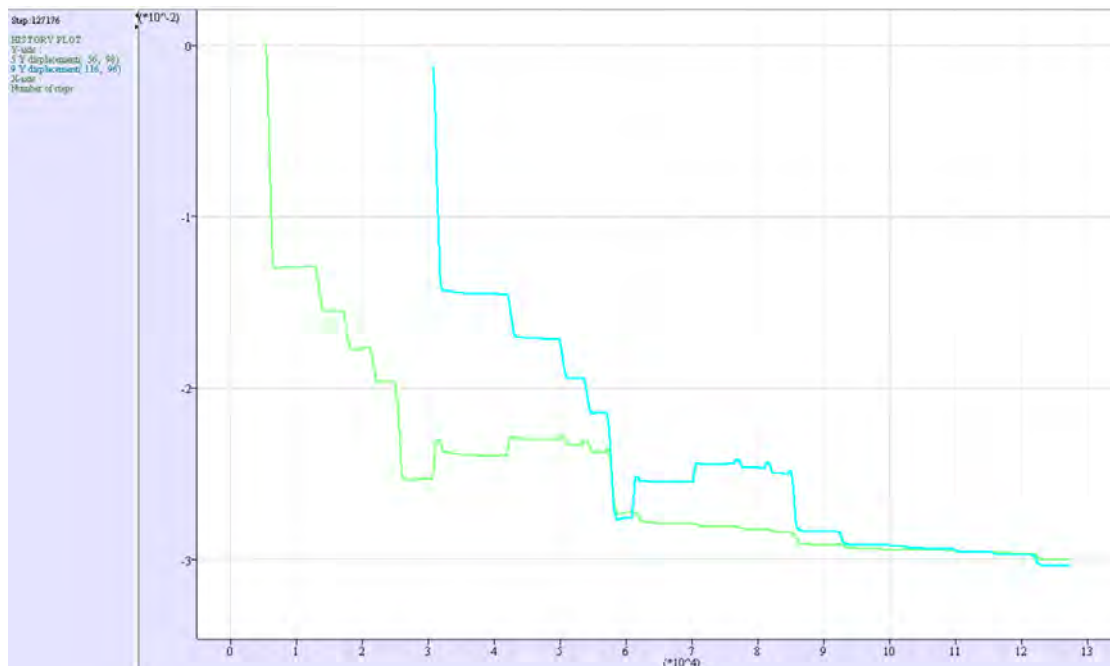
Β' Φάση εκσκαφής (κάτω ημιδιατομή)				
Ολικές μετατοπίσεις στην οροφή της σήραγγας (mm)	Αριστερού κλάδου μετά την εκσκαφή - υποστήριξη της κάτω ημιδιατομής	Δεξιού κλάδου μετά την εκσκαφή - υποστήριξη της αριστερά κάτω ημιδιατομής	Αριστερού κλάδου μετά την εκσκαφή - υποστήριξη της δεξιά κάτω ημιδιατομής	Δεξιού κλάδου μετά την εκσκαφή - υποστήριξη της κάτω ημιδιατομής
Κατηγορία εδάφους I	8,26	8,27	8,53	8,7
Κατηγορία εδάφους II	17,26	17,33	17,83	18,28
Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα)	14,09	13,86	14,28	14,26
Κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα)	29,17	28,41	30,03	30,36

➤ **Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα)**



Σχήμα 9.112. Χρονοϊστορία κατακόρυφης μετατόπισης στην οροφή κάθε κλάδου της δίδυμης σήραγγας (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα). Η πράσινη γραμμή αντιστοιχεί στον αριστερό κλάδο ,ενώ η μπλε στο δεξιό κλάδο.

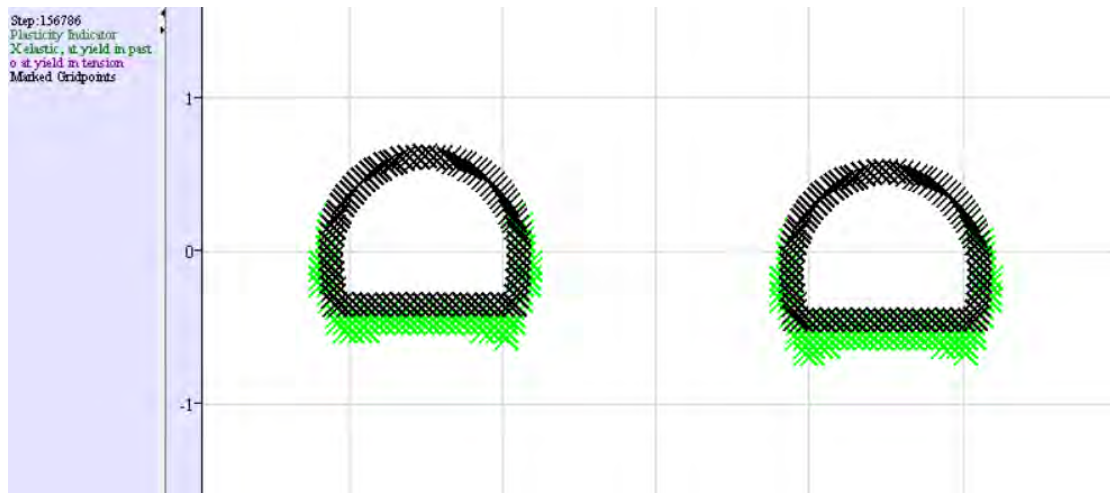
➤ **Κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα)**



Σχήμα 9.113. Χρονοϊστορία κατακόρυφης μετατόπισης στην οροφή κάθε κλάδου της δίδυμης σήραγγας (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα). Η πράσινη γραμμή αντιστοιχεί στον αριστερό κλάδο ,ενώ η μπλε στο δεξιό κλάδο.

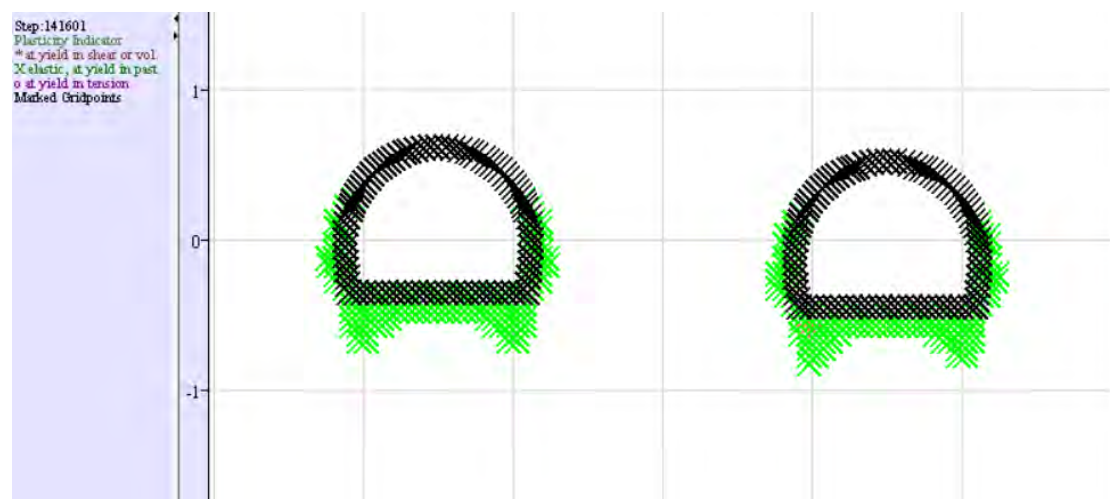
Πλαστικοποιημένες περιοχές

➤ Κατηγορία εδάφους I



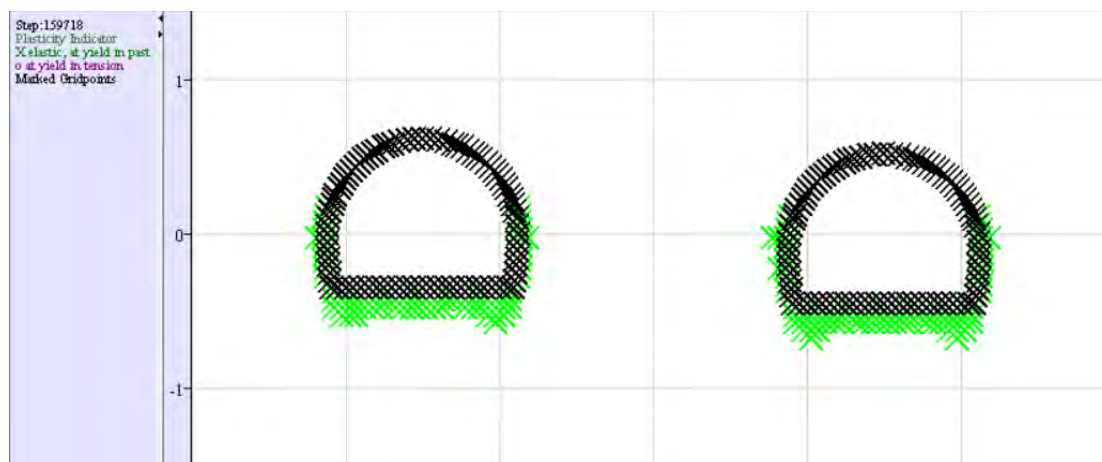
Σχήμα 9.114. Ζώνη πλαστικοποίησης μετά την εφαρμογή των μέτρων άμεσης υποστήριξης (Κατηγορία εδάφους I)

➤ Κατηγορία εδάφους II



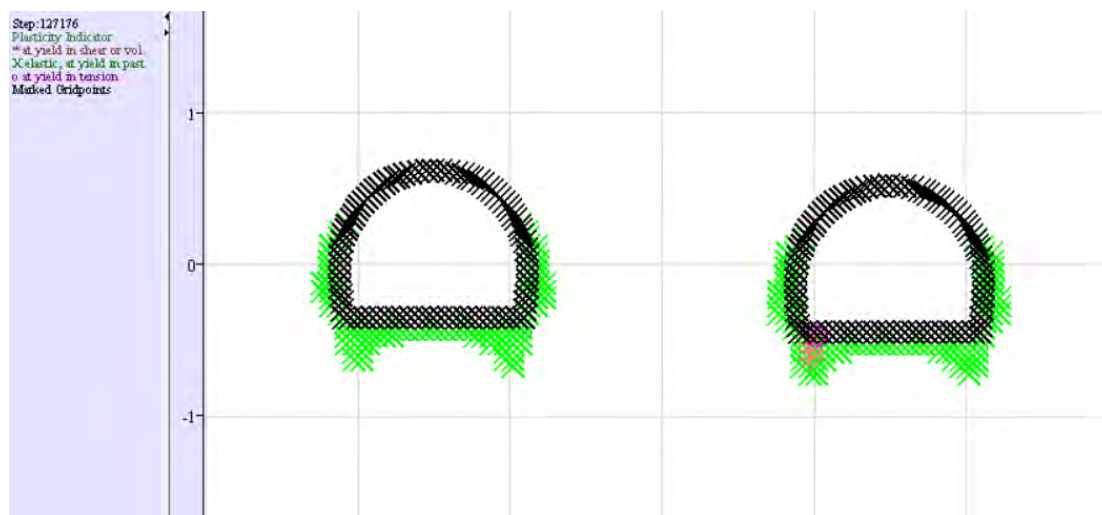
Σχήμα 9.115. Ζώνη πλαστικοποίησης μετά την εφαρμογή των μέτρων άμεσης υποστήριξης (Κατηγορία εδάφους II)

➤ **Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα)**



Σχήμα 9.116. Ζώνη πλαστικοποίησης μετά την εφαρμογή των μέτρων άμεσης υποστήριξης (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα)

➤ **Κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα)**



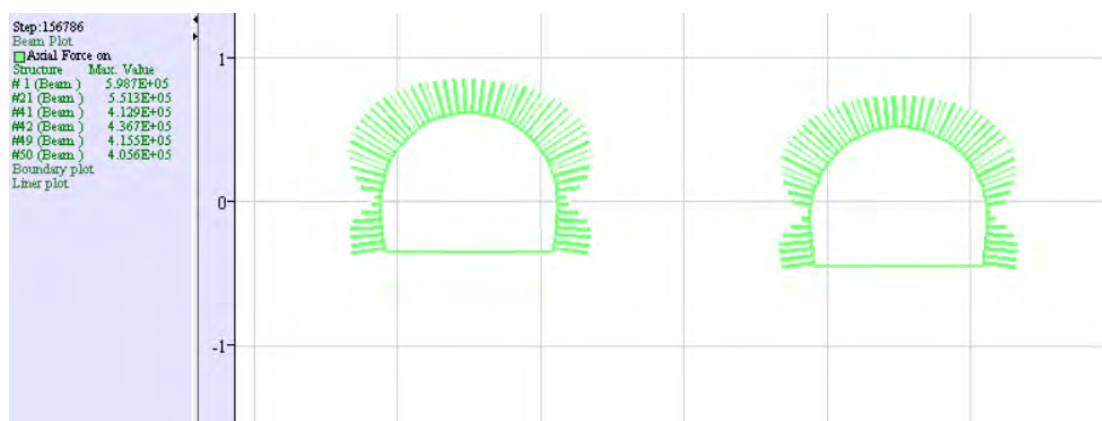
Σχήμα 9.117. Ζώνη πλαστικοποίησης μετά την εφαρμογή των μέτρων άμεσης υποστήριξης (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα)

Από τα παραπάνω σχήματα παρατηρείται ότι δεν υπάρχει σημαντική αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο σηράγγων.

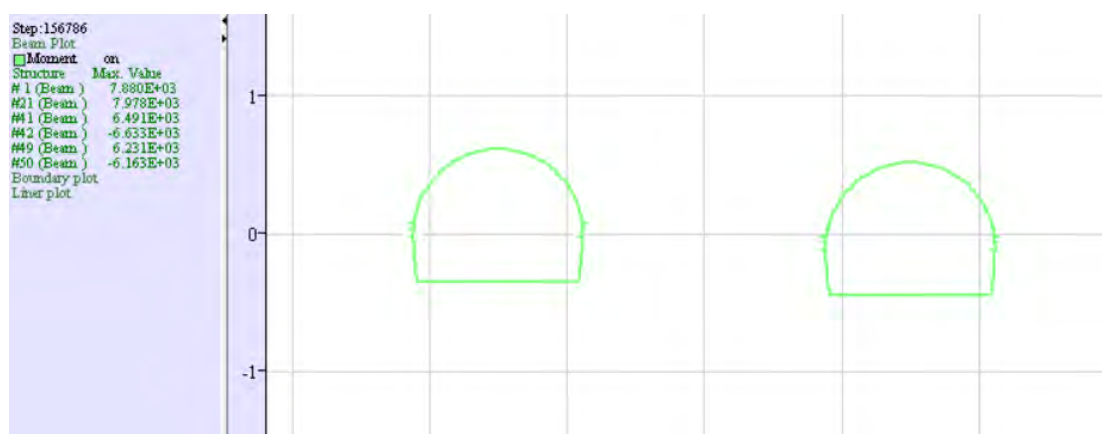
Καταπόνηση μέτρων άμεσης υποστήριξης

➤ Κατηγορία εδάφους I

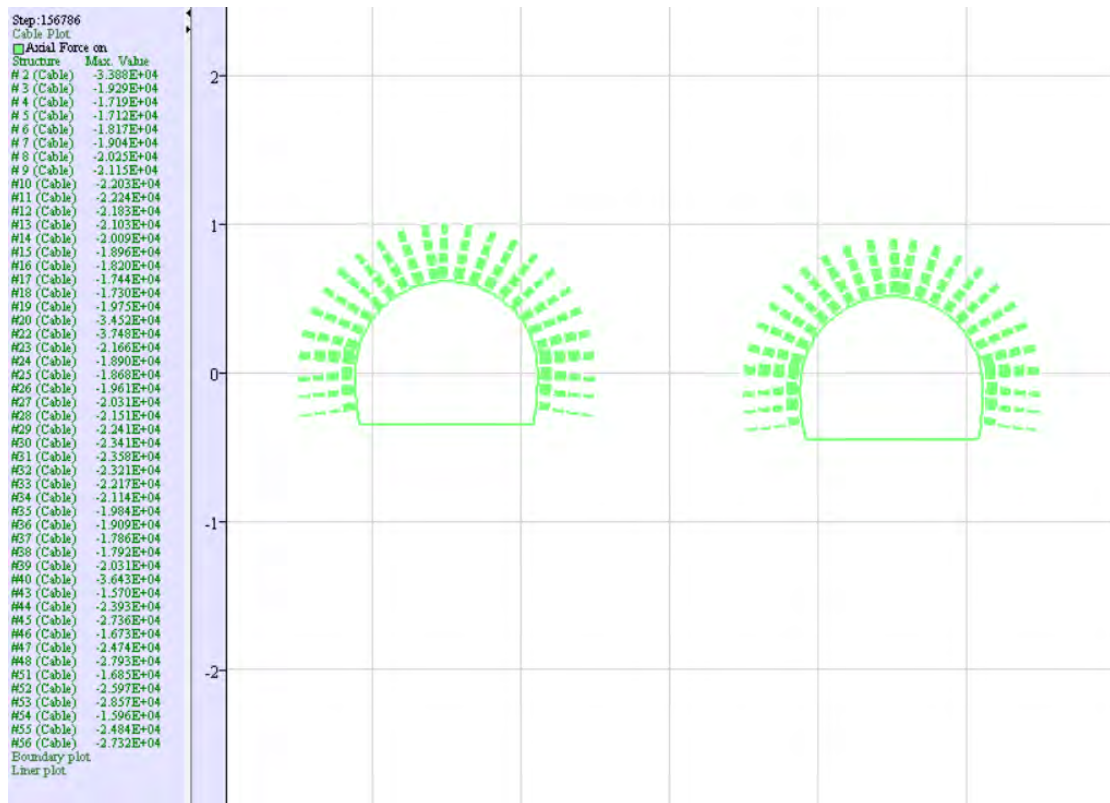
- Μέγιστη αξονική δύναμη εκτοξευόμενου σκυροδέματος 598.7 kN στον αριστερό κλάδο
- Μέγιστη καμπτική ροπή εκτοξευόμενου σκυροδέματος 7.98 kNm στο δεξιό κλάδο
- Μέγιστη αξονική δύναμη αγκυρίων 37,48 kN στο δεξιό κλάδο



Σχήμα 9.118. Αξονικές δυνάμεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους I)



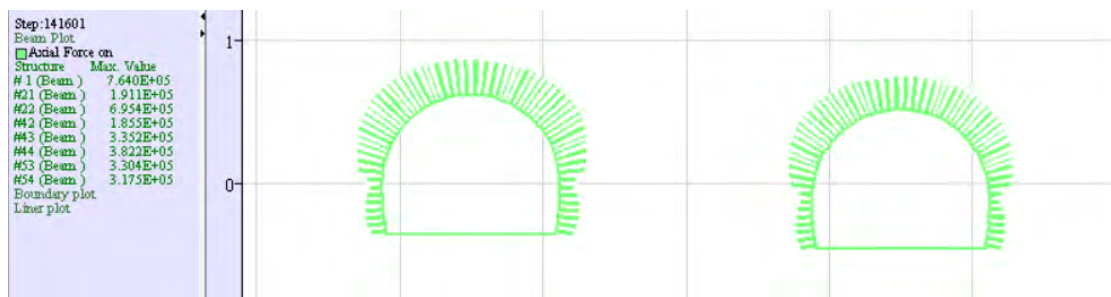
Σχήμα 9.119. Καμπτικές ροπές εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους I)



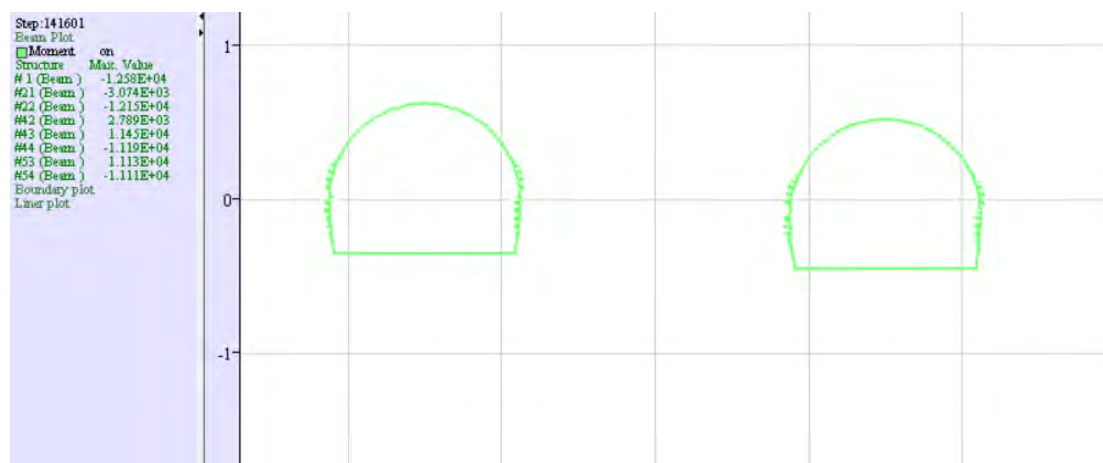
Σχήμα 9.120. Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων (Κατηγορία εδάφους Ι)

➤ Κατηγορία εδάφους ΙΙ

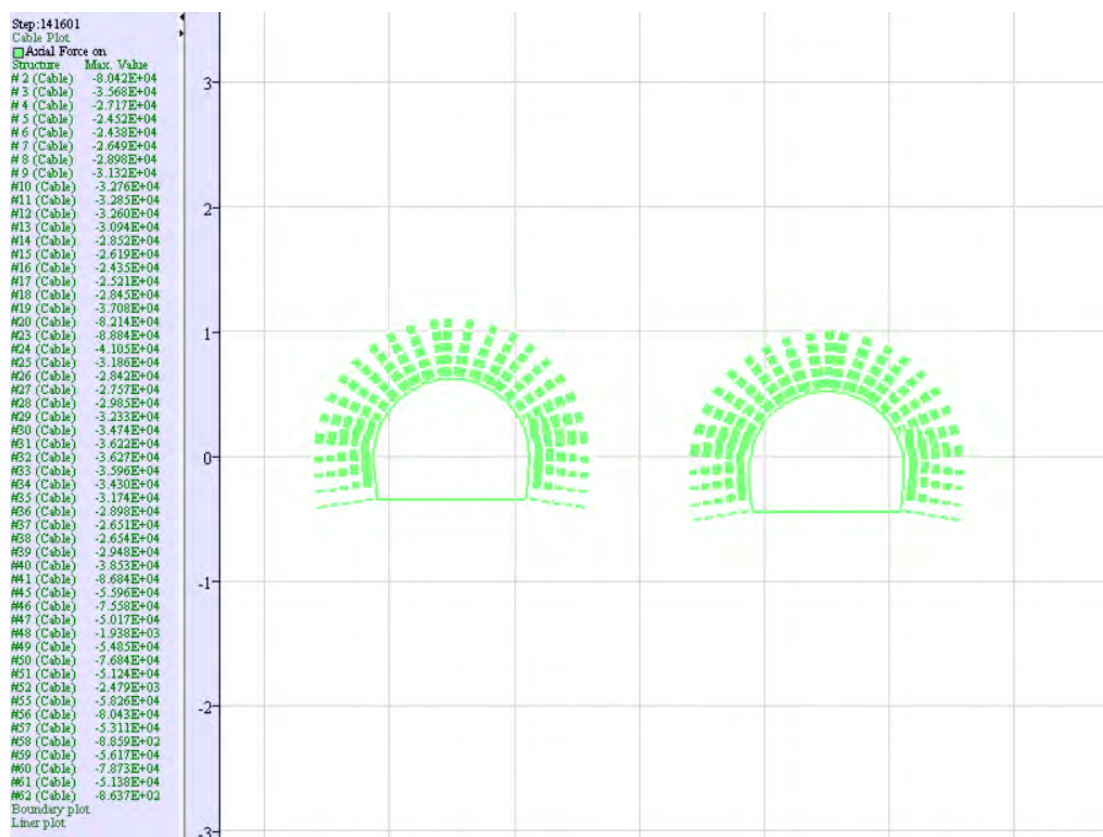
- Μέγιστη αξονική δύναμη εκτοξευόμενου σκυροδέματος 764 kN στον αριστερό κλάδο
- Μέγιστη καμπτική ροπή εκτοξευόμενου σκυροδέματος 12,58 kNm στον αριστερό κλάδο
- Μέγιστη αξονική δύναμη αγκυρίων 88,84 kN στο δεξιό κλάδο



Σχήμα 9.121. Αξονικές δυνάμεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους ΙΙ)



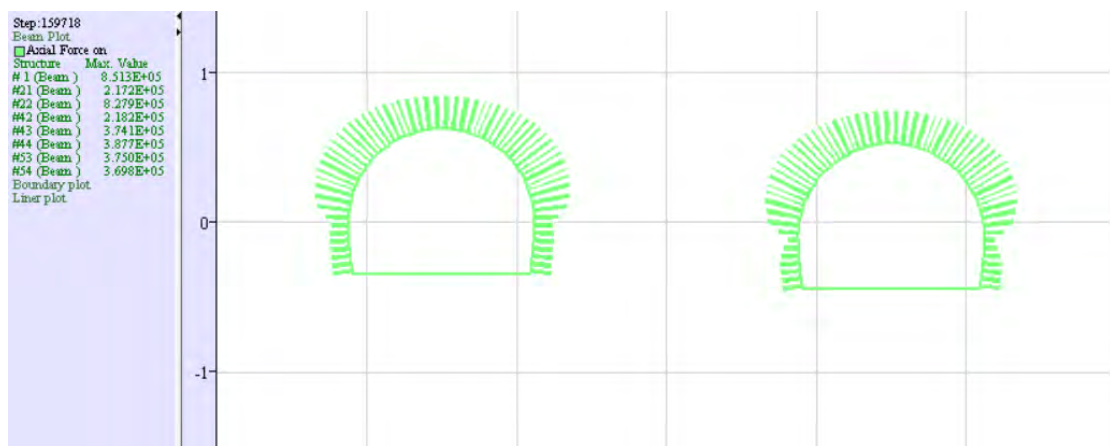
Σχήμα 9.122. Καμπτικές ροπές εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II)



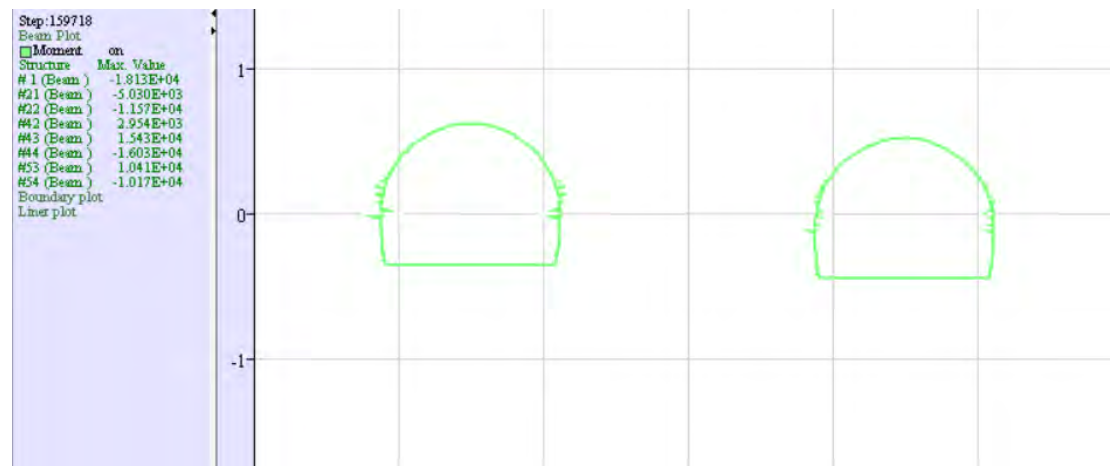
Σχήμα 9.123. Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων (Κατηγορία εδάφους II)

➤ **Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα)**

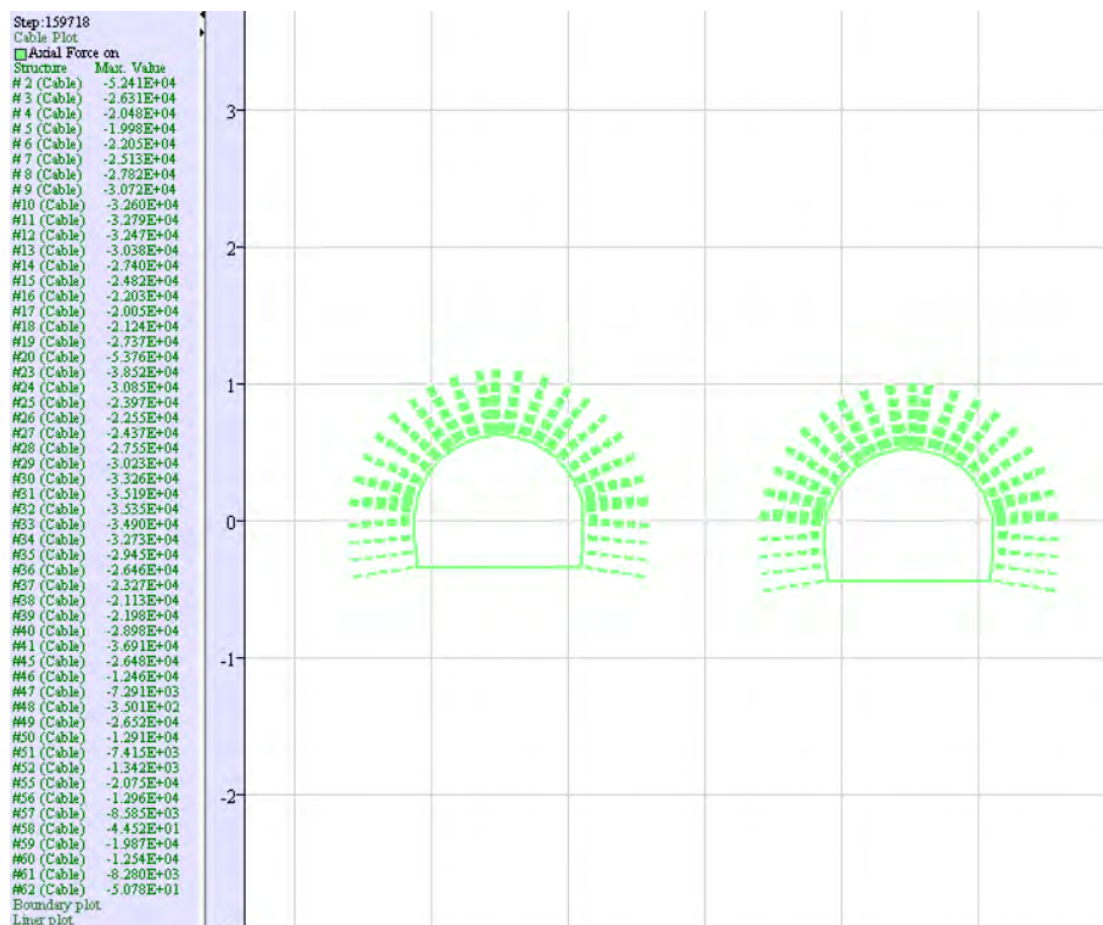
- Μέγιστη αξονική δύναμη εκτοξευόμενου σκυροδέματος 851,3 kN στον αριστερό κλάδο
- Μέγιστη καμπτική ροπή εκτοξευόμενου σκυροδέματος 18,13 kNm στον αριστερό κλάδο
- Μέγιστη αξονική δύναμη αγκυρίων 52,41 kN στον αριστερό κλάδο



Σχήμα 9.124. Αξονικές δυνάμεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα)



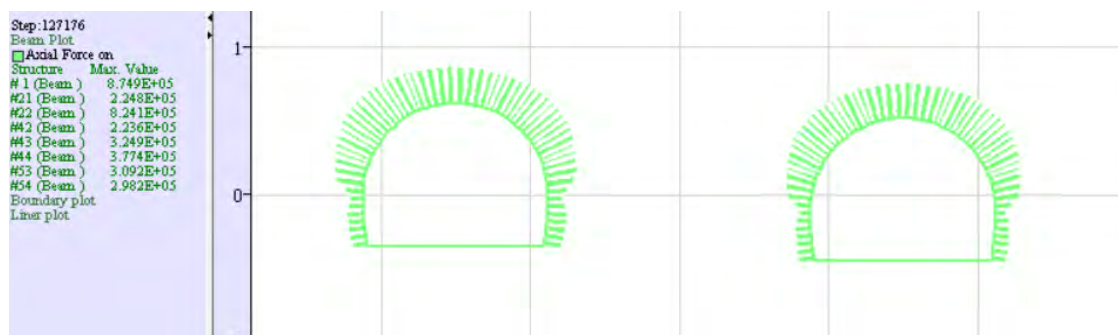
Σχήμα 9.125. Καμπτικές ροπές εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα)



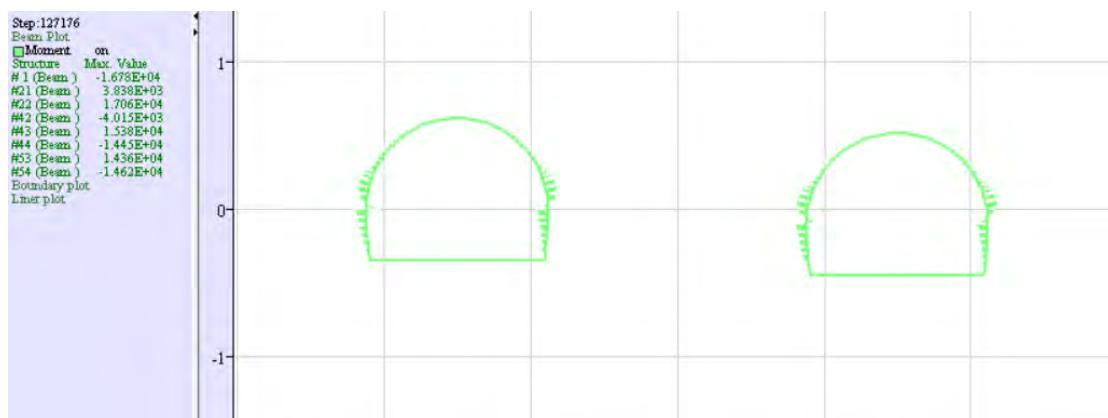
Σχήμα 9.126. Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα)

➤ Κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα)

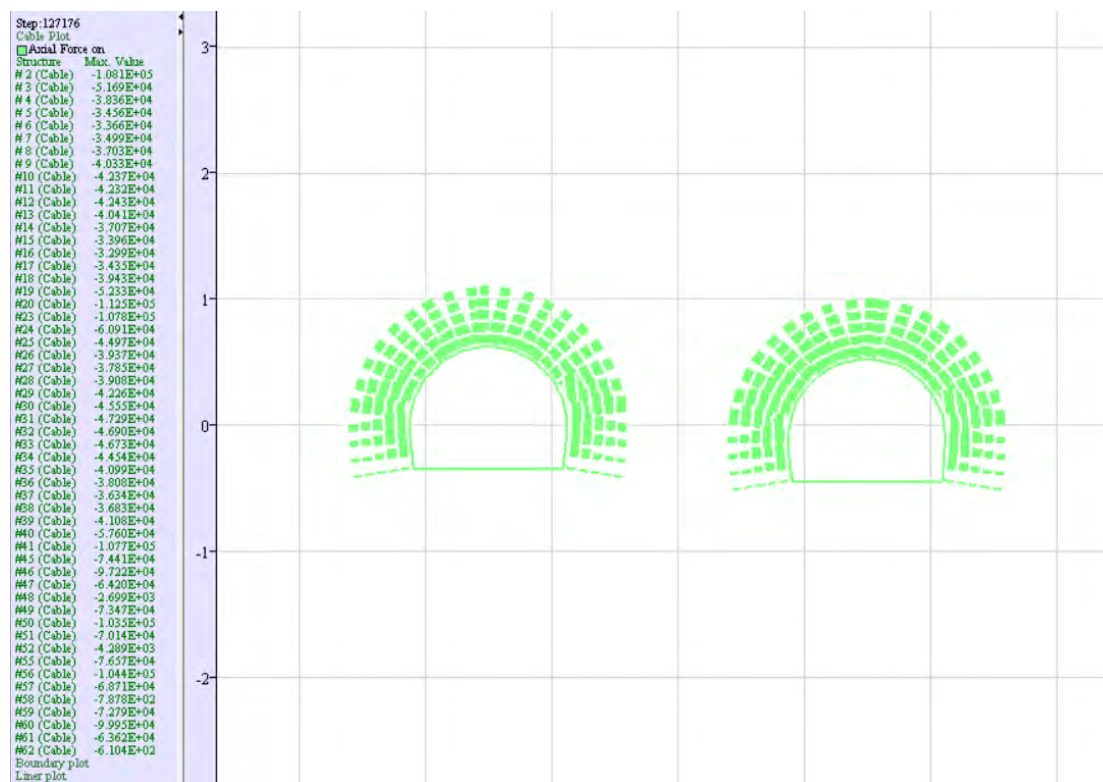
- Μέγιστη αξονική δύναμη εκτοξευόμενου σκυροδέματος 874,9 kN στον αριστερό κλάδο
- Μέγιστη καμπτική ροπή εκτοξευόμενου σκυροδέματος 17,06 kNm στον δεξιό κλάδο
- Μέγιστη αξονική δύναμη αγκυρίων 112,5 kN στον αριστερό κλάδο



Σχήμα 9.127. Αξονικές δυνάμεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα)



Σχήμα 9.128: Καμπτικές ροπές εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα)



Σχήμα 9.129 : Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα)

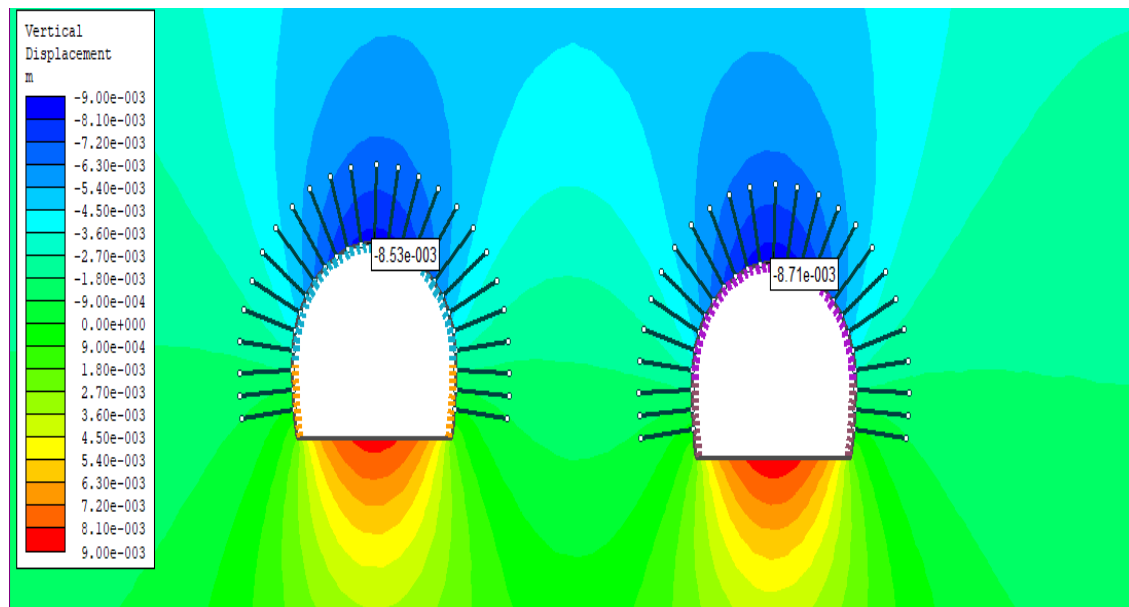
Πίνακας 9.15. Καταπονήσεις μέτρων άμεσης υποστήριξης για όλες τις κατηγορίες

Flac 7.0	Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα		Αγκύρια
	Nmax (kN)	Mmax (kNm)	Nmax (kN)
Κατηγορία εδάφους I	598,7	7,98	37,48
Κατηγορία εδάφους II	764	12,58	88,84
Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα)	851,3	18,13	52,41
Κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα)	874,9	17,06	112,5

9.5.2 Αποτελέσματα με χρήση του προγράμματος Phase² 8.0

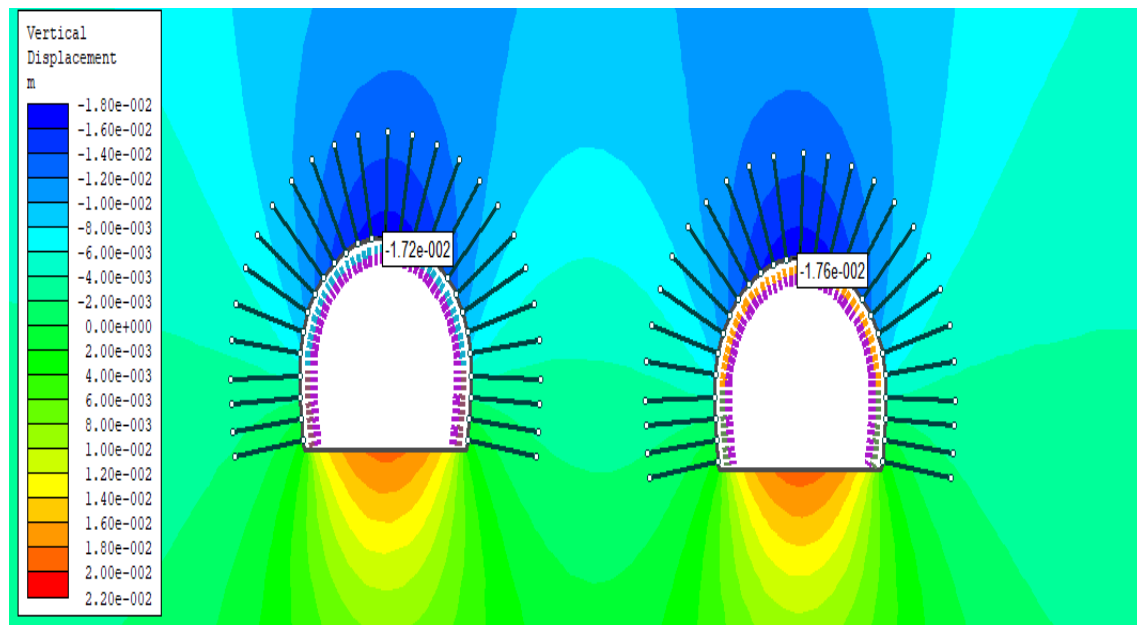
Κατακόρυφες Μετατοπίσεις

➤ Κατηγορία εδάφους I



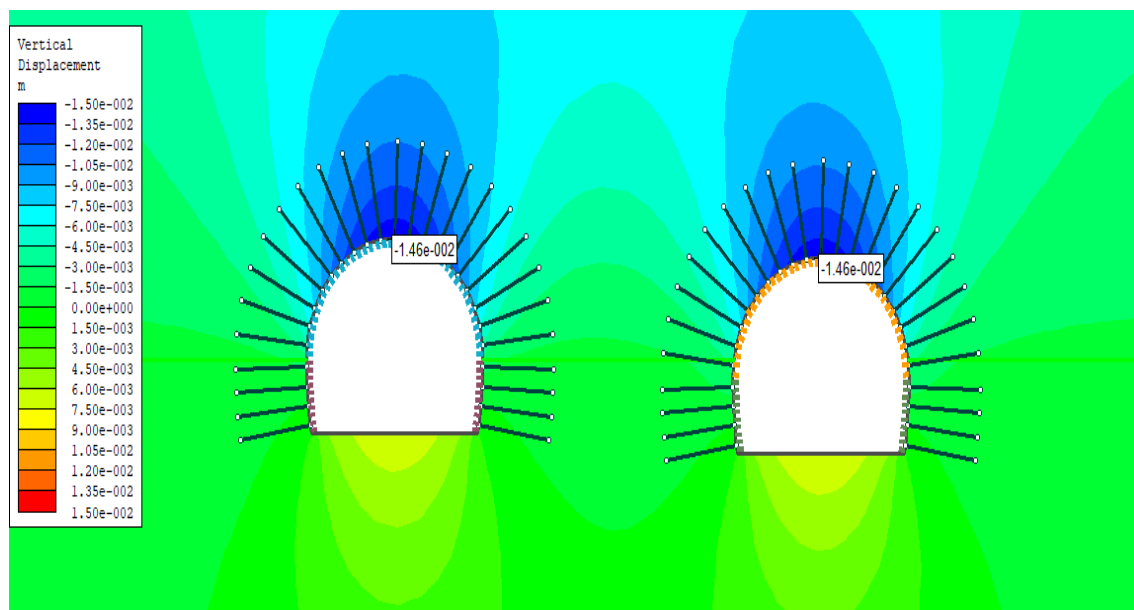
Σχήμα 9.130. Κατακόρυφες μετατοπίσεις (κατηγορία εδάφους I)

➤ Κατηγορία εδάφους II



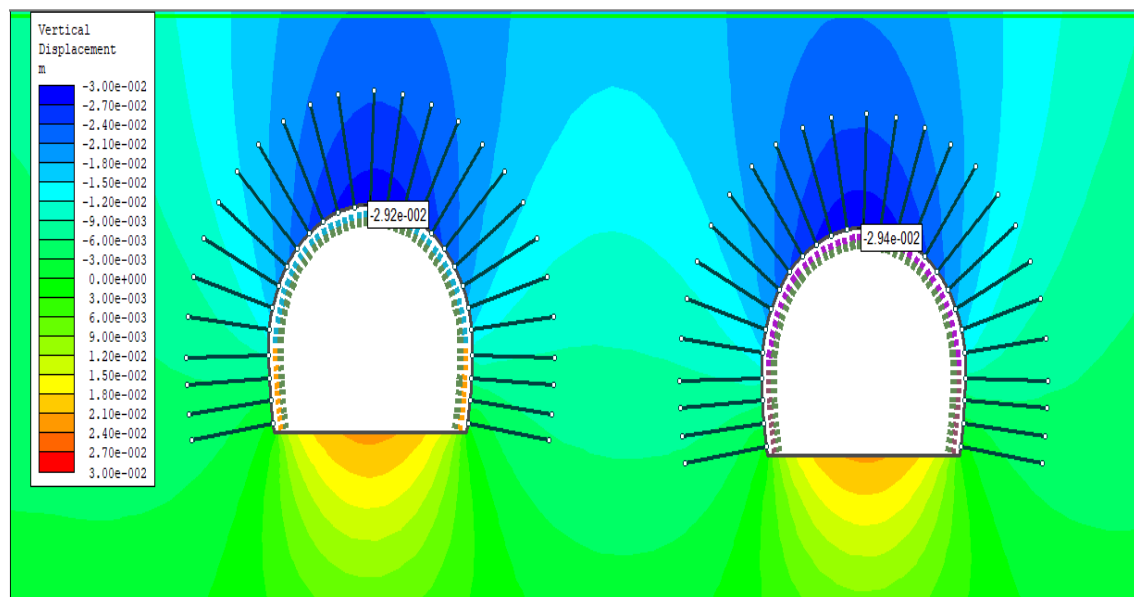
Σχήμα 9.131. Κατακόρυφες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II)

➤ **Κατηγορία II (2-στρώματα)**



Σχήμα 9.132. Κατακόρυφες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα)

➤ **Κατηγορία II (3-στρώματα)**



Σχήμα 9.133. Κατακόρυφες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα)

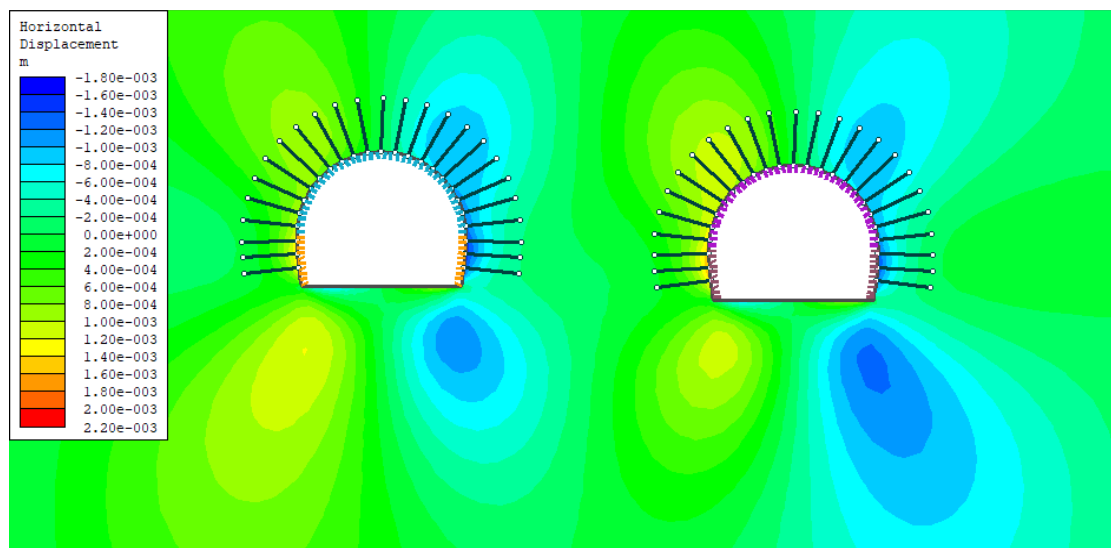
Στον πίνακα παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετατοπίσεις για την οροφή, το δάπεδο και τα τοιχώματα κατά τη διάνοιξη δίδυμης σήραγγας μετά από την τοποθέτηση των μέτρων αντιστήριξης.

Πίνακας 9.16. Κατακόρυφες μετατοπίσεις σε οροφή, δάπεδο και τοιχώματα για δίδυμη σήραγγα για όλες τις κατηγορίες

Phase ² 8.0	Αριστερός κλάδος				Δεξιός κλάδος			
	u _y (mm) οροφή	u _y (mm) δάπεδο	u _y (mm) αριστερή παρειά	u _y (mm) δεξιά παρειά	u _y (mm) οροφή	u _y (mm) δάπεδο	u _y (mm) αριστερή παρειά	u _y (mm) δεξιά παρειά
Κατηγορία εδάφους I	-8,53	9	-2,01	-2,07	-8,71	8,69	-1,96	-1,97
Κατηγορία εδάφους II	-17,2	18,6	-5,33	-5,41	-17,6	18,9	-4,99	-4,81
Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα)	-14,6	6,91	-2,57	-2,63	-14,6	7,03	-2,54	-2,45
Κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα)	-29,2	22	-10,8	-12,2	-29,4	21,6	-11,7	-10,1

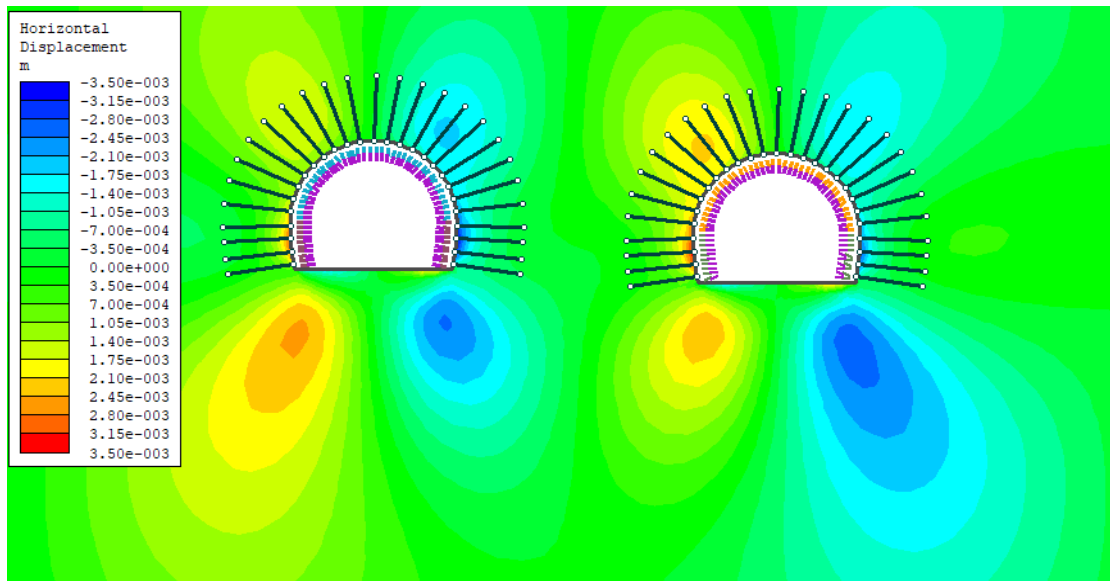
Οριζόντιες μετατοπίσεις

➤ Κατηγορία I



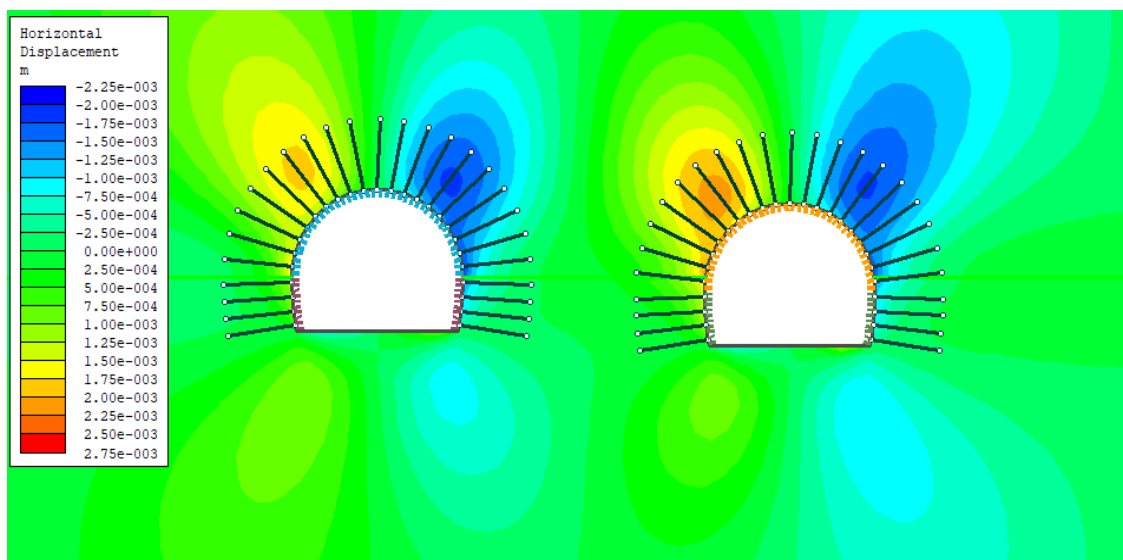
Σχήμα 9.134. Οριζόντιες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους I)

➤ **Κατηγορία II**



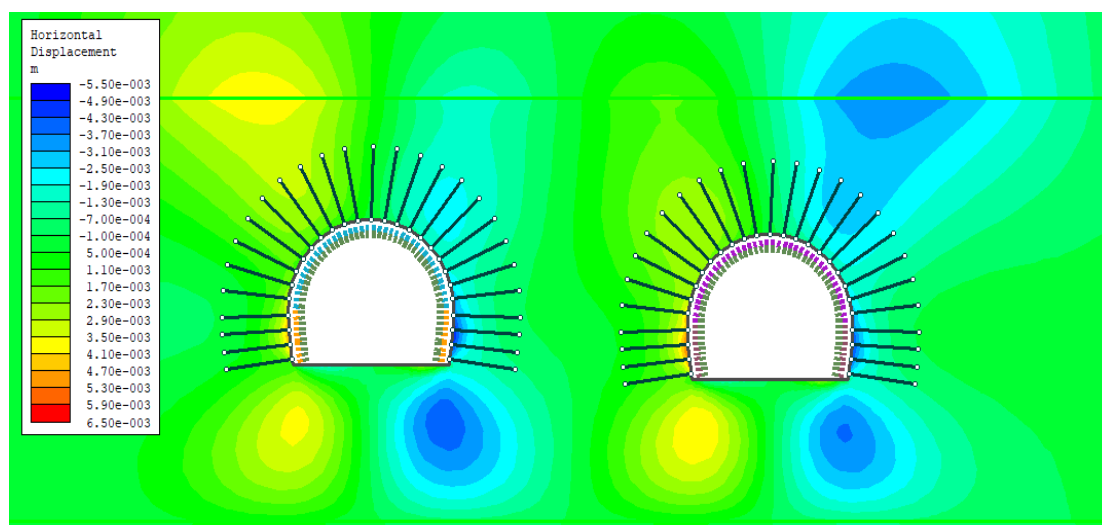
Σχήμα 9.135. Οριζόντιες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II)

➤ **Κατηγορία II (2-στρώματα)**



Σχήμα 9.136. Οριζόντιες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα)

➤ **Κατηγορία II (3-στρώματα)**



Σχήμα 9.137. Οριζόντιες μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα)

Στον πίνακα παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετατοπίσεις στα τοιχώματα των δύο σηράγγων. Οι τιμές των οριζόντιων μετατοπίσεων στην οροφή και στο δάπεδο δεν αναγράφονται καθώς είναι μηδενικές.

Πίνακας 9.17. Οριζόντιες μετατοπίσεις στα τοιχώματα για δίδυμη σήραγγα για όλες τις κατηγορίες

Phase ² 8.0	Αριστερός κλάδος		Δεξιός κλάδος	
	u _y (mm) αριστερή παρειά	u _y (mm) δεξιά παρειά	u _y (mm) αριστερή παρειά	u _y (mm) δεξιά παρειά
Κατηγορία εδάφους I	1,27	-1,43	1,47	-1,3
Κατηγορία εδάφους II	2,4	-2,89	2,82	-2,3
Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα)	1,6	-1,78	1,43	-1,15
Κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα)	3,8	-4,22	4,41	-3,62

Ολικές Μετατοπίσεις

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται οι συγκλίσεις στις οροφές των σήραγγων όπως προκύπτουν κατά τα στάδια εκσκαφής και υποστήριξης των δύο κλάδων. Όπως έχει αναφερθεί στην Ενότητα 8.6, η διάνοιξη της δίδυμης σήραγγας γίνεται σε δύο φάσεις για κάθε κλάδο.

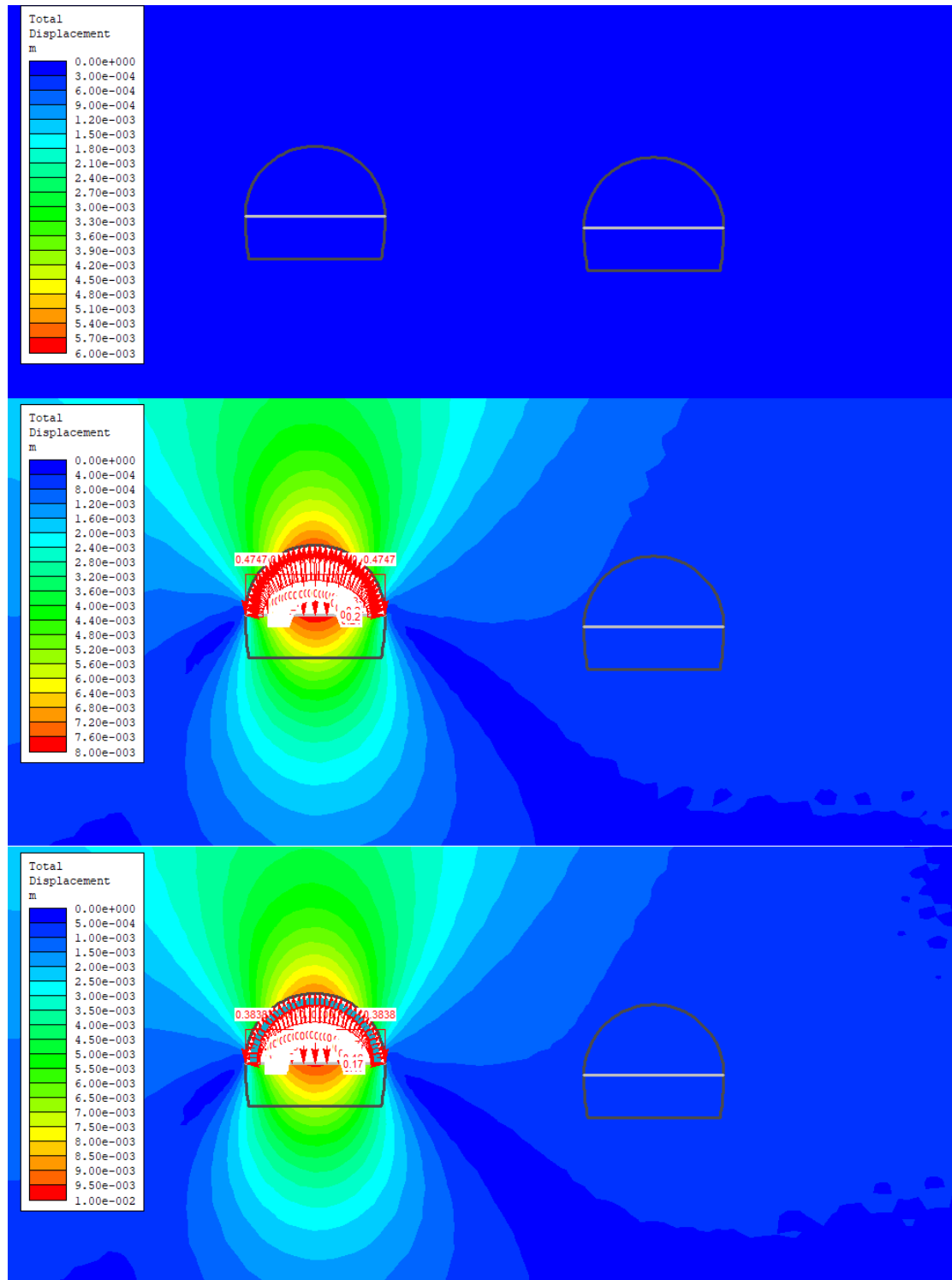
Πίνακας 9.18. Ολικές μετατοπίσεις για όλες τις κατηγορίες

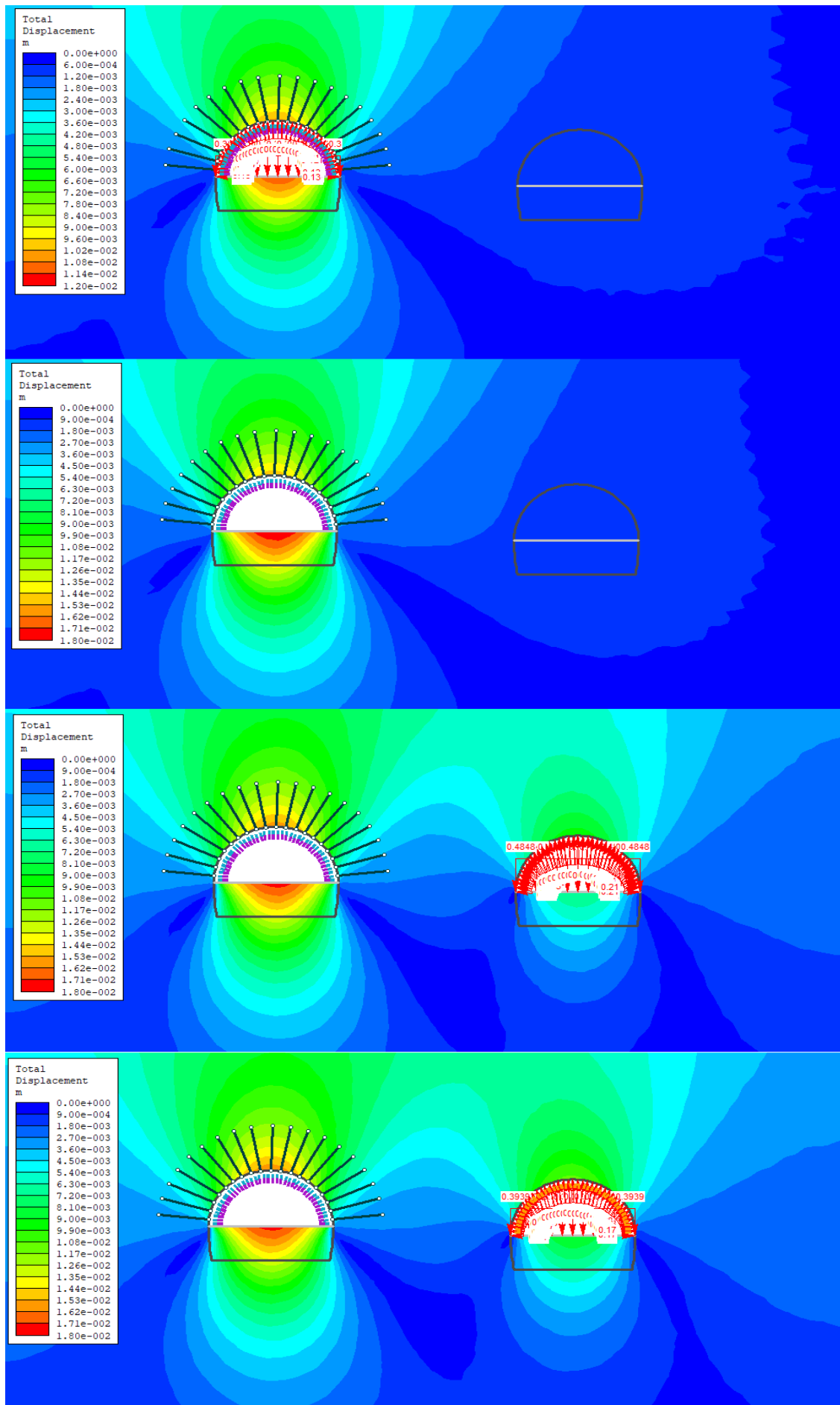
Α' Φάση εκσκαφής (άνω ημιδιατομή)			
Ολικές μετατοπίσεις στην οροφή της σήραγγας (mm)	Αριστερού κλάδου μετά την εκσκαφή - υποστήριξη της άνω ημιδιατομής	Αριστερού κλάδου μετά την εκσκαφή - υποστήριξη της δεξιά άνω ημιδιατομής	Δεξιού κλάδου μετά την εκσκαφή - υποστήριξη της άνω ημιδιατομής
Κατηγορία εδάφους I	7,11	7,93	8,1
Κατηγορία εδάφους II	14,9	16,6	17
Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα)	13,1	13,8	14
Κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα)	25,7	27,8	28

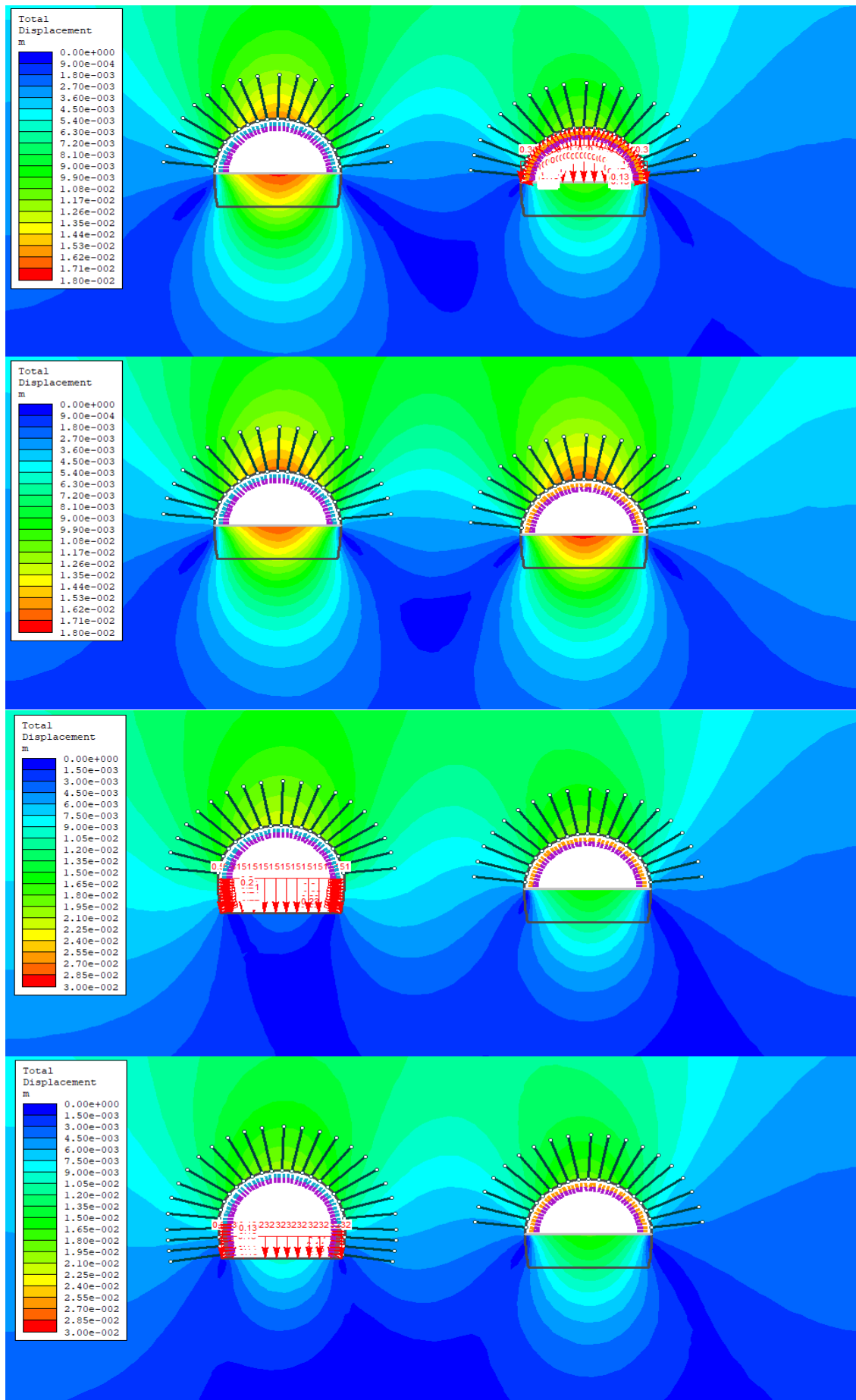
Πίνακας 9.19. Ολικές μετατοπίσεις για όλες τις κατηγορίες

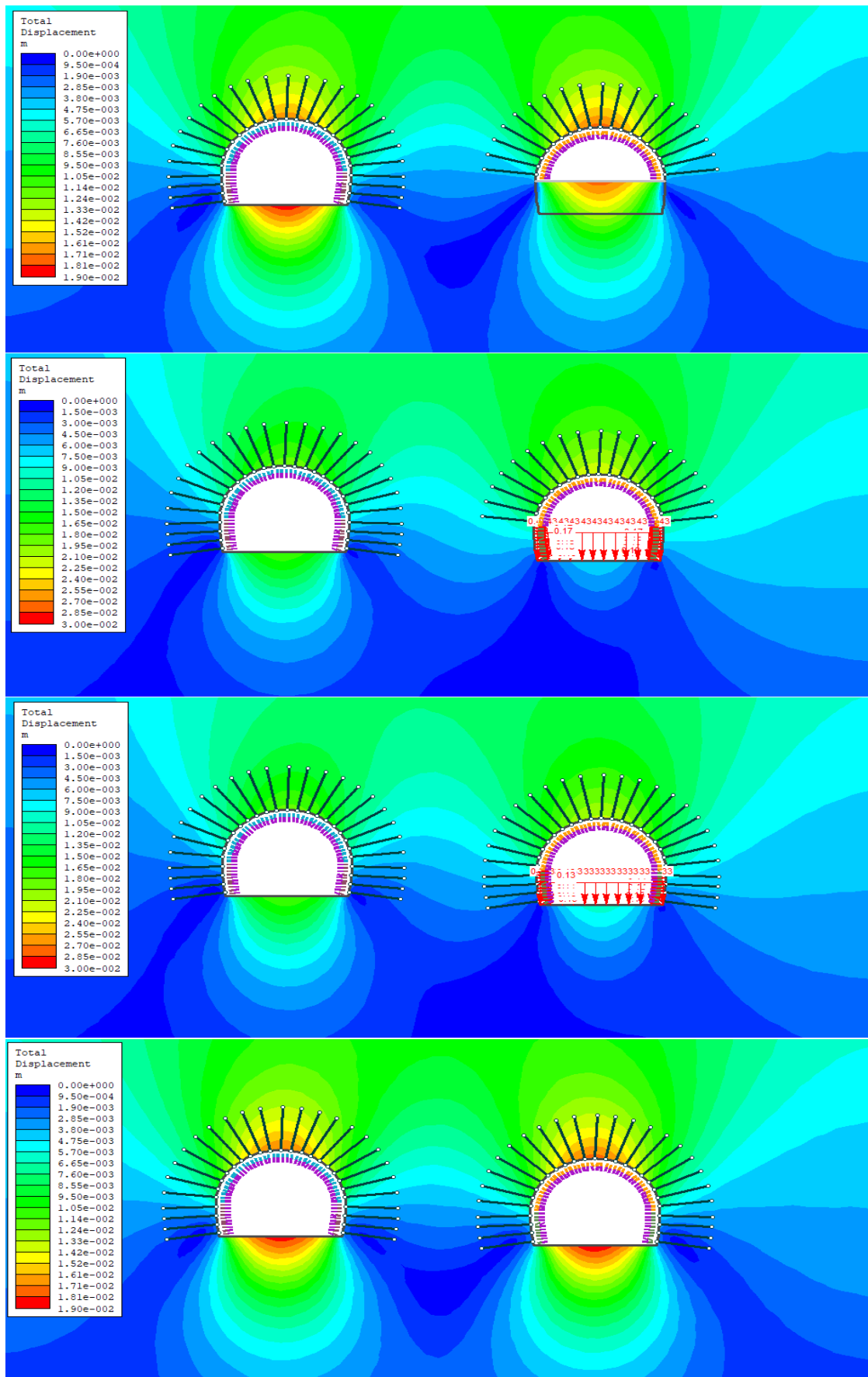
Α' Φάση εκσκαφής (άνω ημιδιατομή)			
Ολικές μετατοπίσεις στην οροφή της σήραγγας (mm)	Αριστερού κλάδου μετά την εκσκαφή - υποστήριξη της άνω ημιδιατομής	Αριστερού κλάδου μετά την εκσκαφή - υποστήριξη της δεξιά άνω ημιδιατομής	Δεξιού κλάδου μετά την εκσκαφή - υποστήριξη της άνω ημιδιατομής
Κατηγορία εδάφους I	7,11	7,93	8,1
Κατηγορία εδάφους II	14,9	16,6	17
Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα)	13,1	13,8	14
Κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα)	25,7	27,8	28

Στο σχήμα 9.138 φαίνεται η εξέλιξη των ολικών μετατοπίσεων ανά στάδιο προσομοίωσης για την κατηγορία εδάφους II.





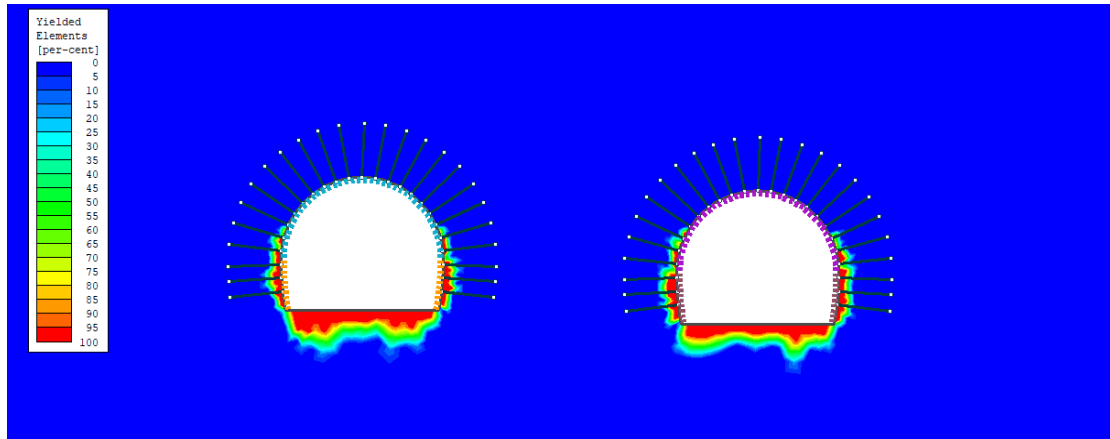




Σχήμα 9.138. εξέλιξη των ολικών μετατοπίσεων ανά στάδιο προσομοίωσης για την κατηγορία εδάφους II

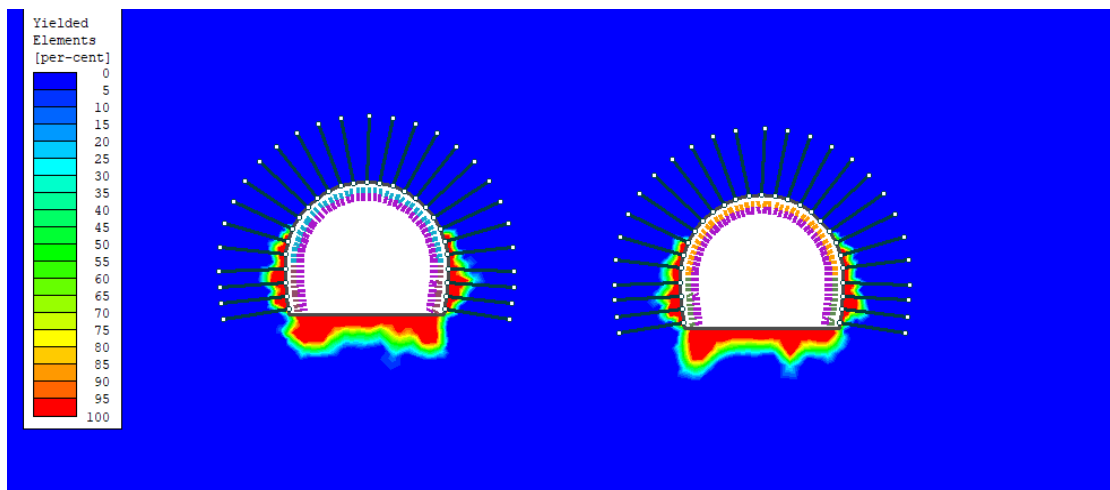
Πλαστικοποιημένες περιοχές

➤ Κατηγορία I



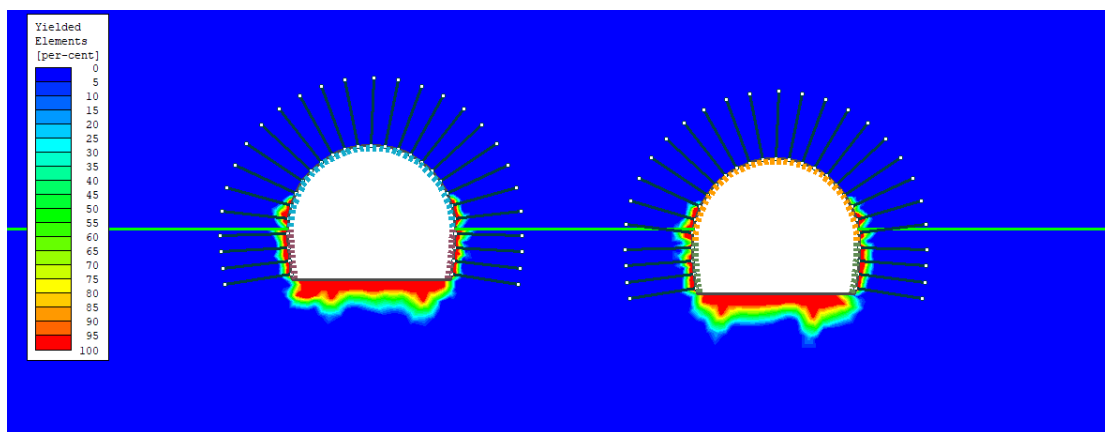
Σχήμα 9.139. Ζώνη πλαστικοποίησης για κατηγορία εδάφους I

➤ Κατηγορία II



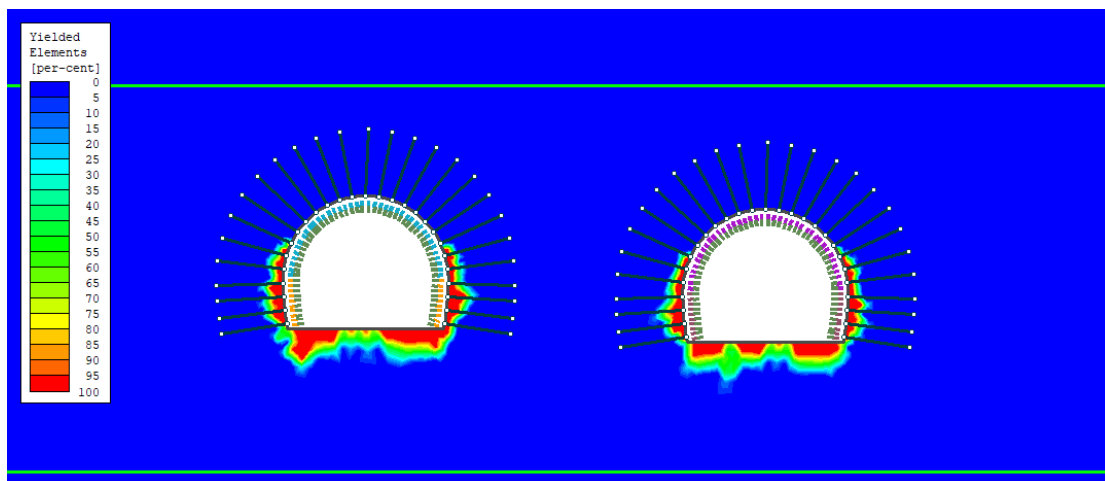
Σχήμα 9.140. Ζήνα πλαστικοποίησης για κατηγορία II

➤ **Κατηγορία II (2-στρώματα)**



Σχήμα 9.141. Ζώνη πλαστικοποίησης για κατηγορία II (2-στρώματα)

➤ **Κατηγορία II (3-στρώματα)**

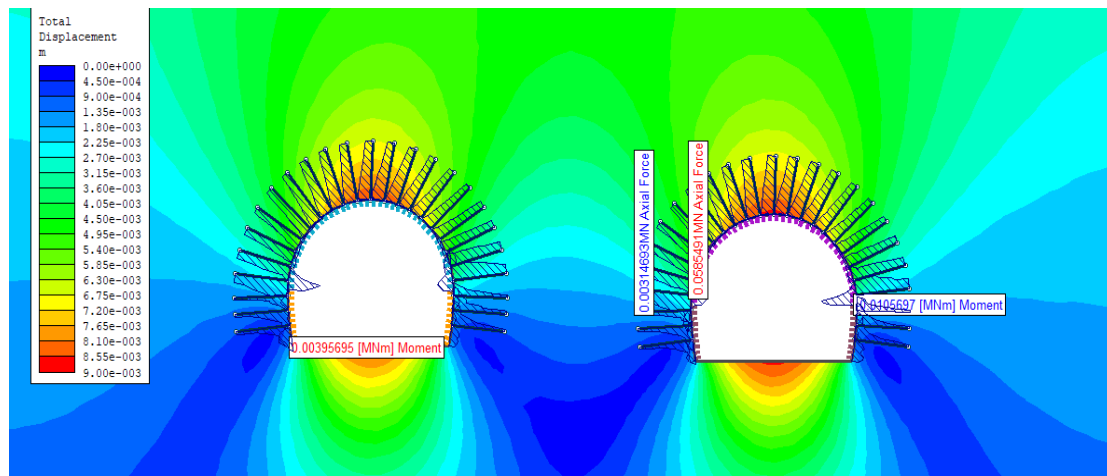


Σχήμα 9.142. Ζώνη πλαστικοποίησης για κατηγορία II (3-στρώματα)

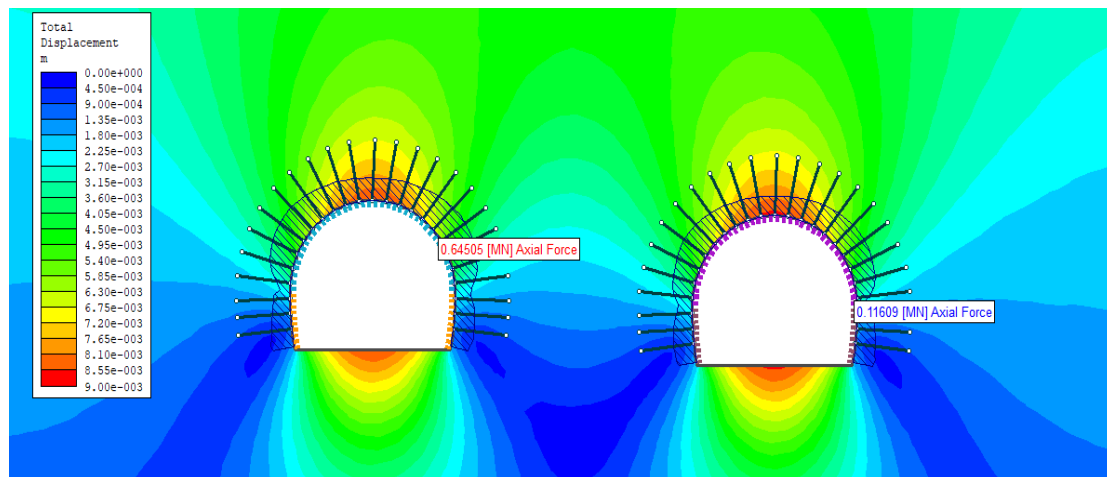
Όπως φαίνεται από τα παραπάνω σχήματα δεν υπάρχει σημαντική αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο σηράγγων. Οι πλαστικές ζώνες αναπτύσσονται κυρίως γύρω από την περιοχή των τοιχωμάτων και των δαπέδων των δύο σηράγγων.

Καταπόνηση μέτρων άμεσης υποστήριξης

➤ Κατηγορία I



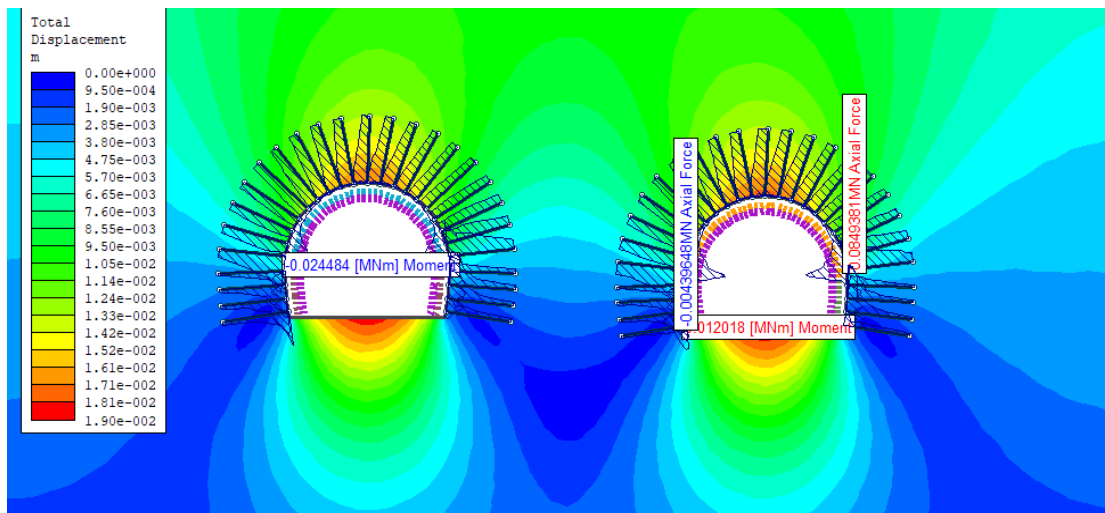
Σχήμα 9.143. Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων και καμπτικές ροπές εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους I)



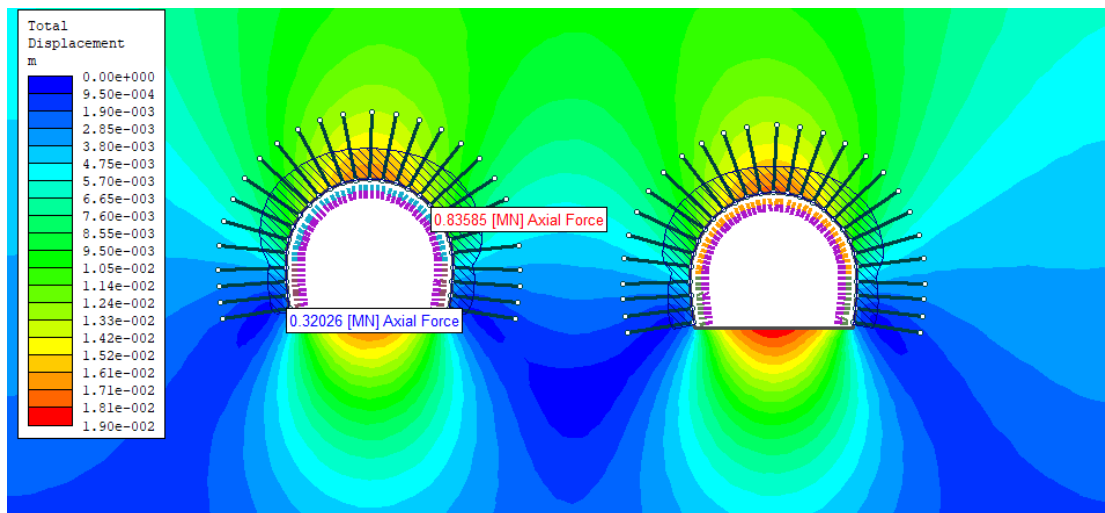
Σχήμα 9.144. Αξονικές δυνάμεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους I)

- Μέγιστη αξονική δύναμη αγκυρίων: 58 kN
- Μέγιστη αξονική δύναμη εκτοξευόμενου σκυροδέματος: 645 kN
- Μέγιστη καμπτική ροπή εκτοξευόμενου σκυροδέματος: 10,6 kNm

➤ Κατηγορία II



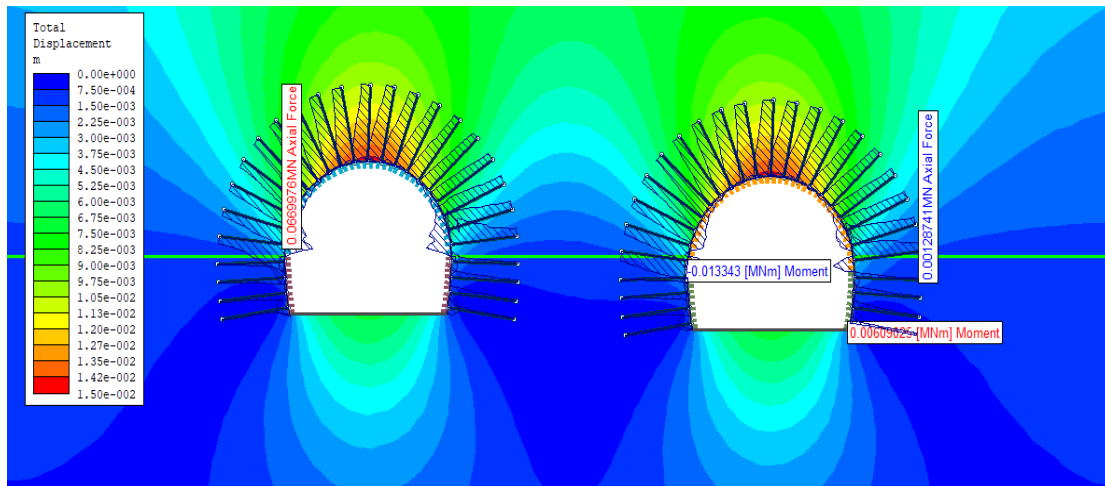
Σχήμα 9.145. . Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων και καμπτικές ροπές εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II)



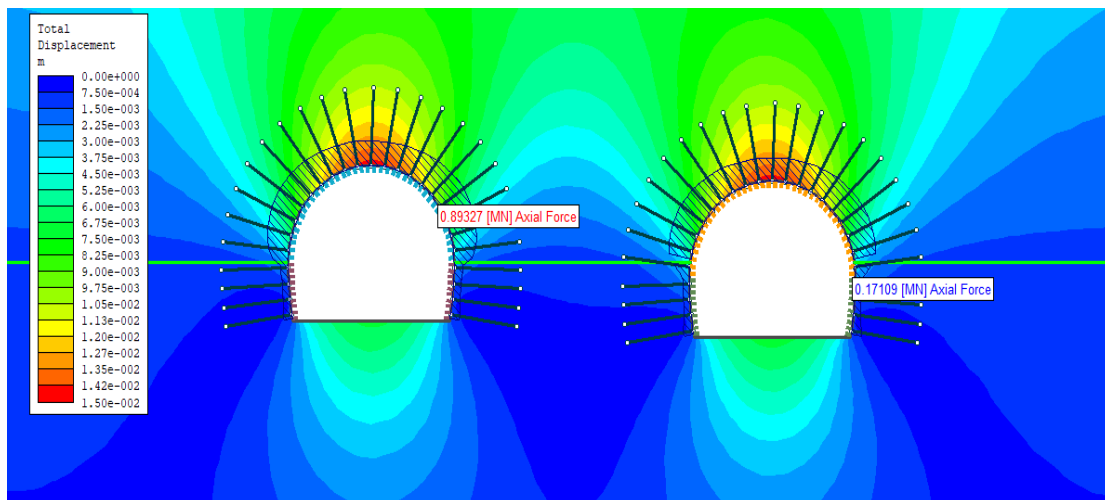
Σχήμα 9.146. Αξονικές δυνάμεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II)

- Μέγιστη αξονική δύναμη αγκυρίων: 85 kN
- Μέγιστη αξονική δύναμη εκτοξευόμενου σκυροδέματος: 836 kN
- Μέγιστη καμπτική ροπή εκτοξευόμενου σκυροδέματος: 24 kNm

➤ **Κατηγορία II (2-στρώματα)**



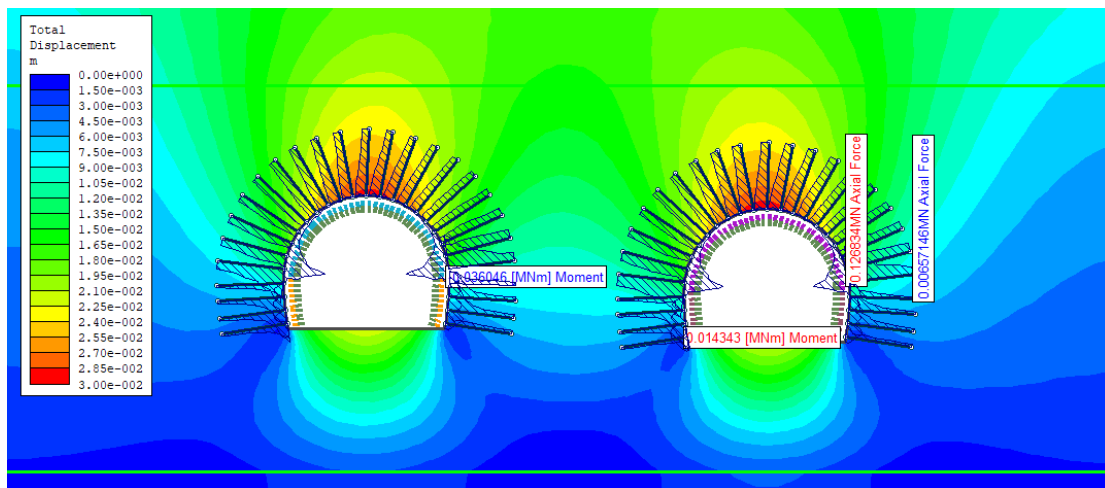
Σχήμα 9.147. Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων και καμπτικές ροπές εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα)



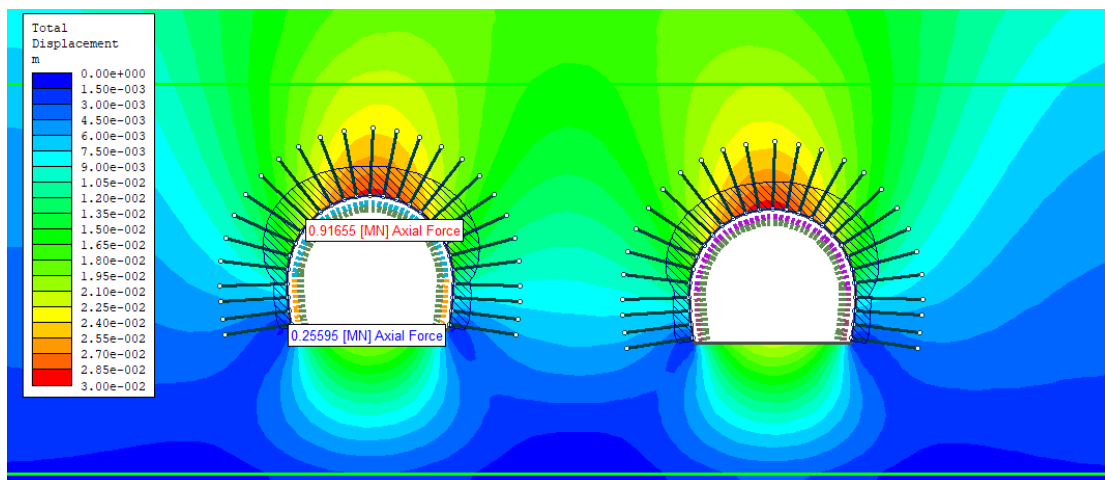
Σχήμα 9.148. Αξονικές δυνάμεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II 2-στρώματα)

- Μέγιστη αξονική δύναμη αγκυρίων: 67 kN
- Μέγιστη αξονική δύναμη εκτοξευόμενου σκυροδέματος: 893 kN
- Μέγιστη καμπτική ροπή εκτοξευόμενου σκυροδέματος: 13 kNm

➤ **Κατηγορία II (3-στρώματα)**



Σχήμα 9.149. Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων και καμπτικές ροπές εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα)



Σχήμα 9.150. Αξονικές δυνάμεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II 3-στρώματα)

- Μέγιστη αξονική δύναμη αγκυρίου: 127 kN
- Μέγιστη αξονική δύναμη εκτοξευόμενου σκυροδέματος: 916 kN
- Μέγιστη καμπτική ροπή εκτοξευόμενου σκυροδέματος: 36 kNm

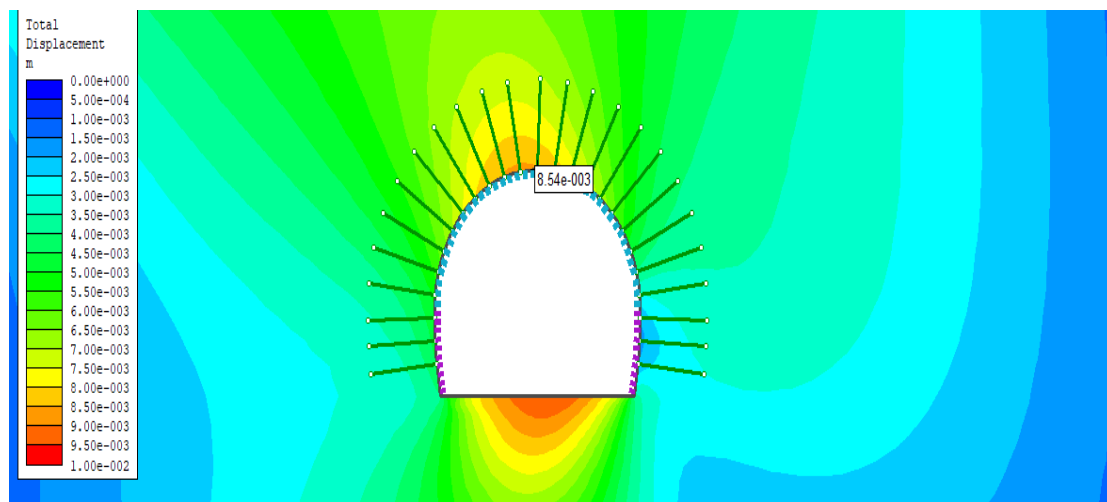
9.6 Αποτελέσματα προσομοίωσης με σεισμικές συνθήκες με χρήση του προγράμματος Phase² 8.0

Στην παράγραφο αυτή, έχουν μελετηθεί οι ολικές μετατοπίσεις και η καταπόνηση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης για την περίπτωση όπου στο τελευταίο στάδιο εκσκαφής λαμβάνονται υπόψη σεισμικές συνθήκες.

9.6.1 Ολικές μετατοπίσεις

➤ Κατηγορία I

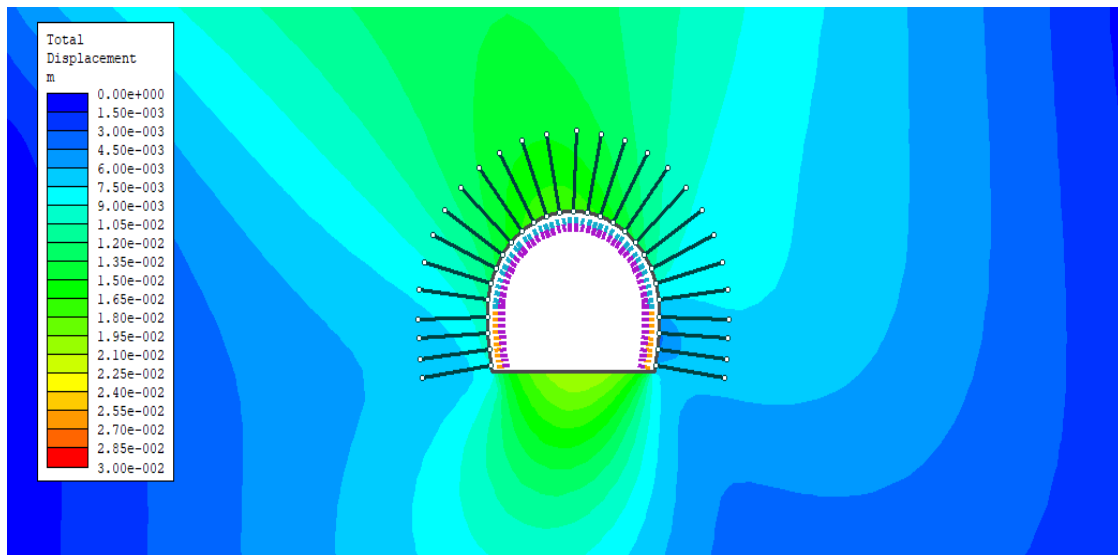
- Οροφή: 8,54 mm
- Δάπεδο: 9,53 mm
- Τοιχώματα: 4,81 mm



Σχήμα 9.151. Ολικές μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους I – μονή σήραγγα)

➤ Κατηγορία II

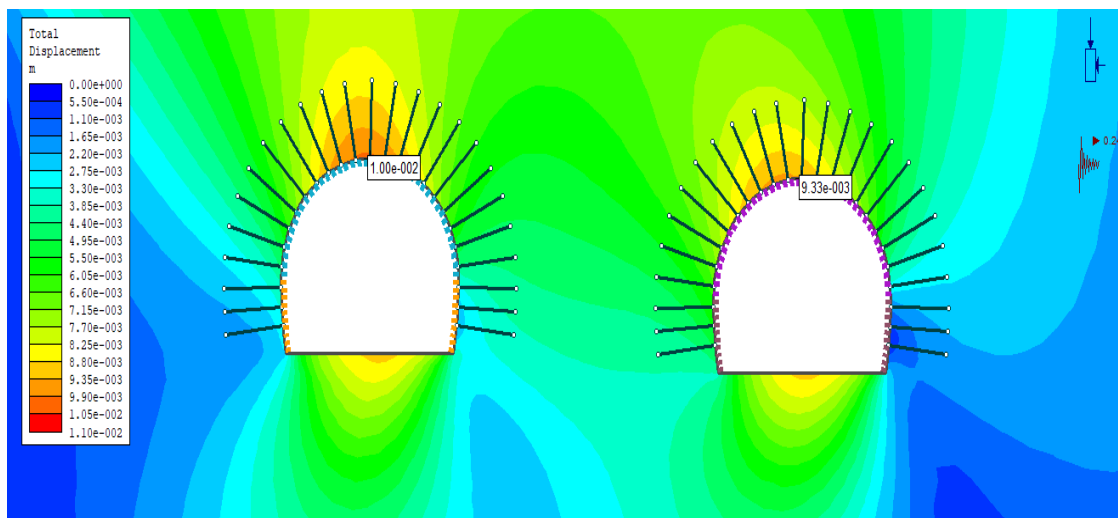
- Οροφή: 17.5 mm
- Δάπεδο: 20.8 mm
- Τοιχώματα: 10.4 mm



Σχήμα 9.152. Ολικές μετατοπίσεις (Κατηγορία εδάφους II – μονή σήραγγα)

➤ **Κατηγορία I (για δίδυμη σήραγγα)**

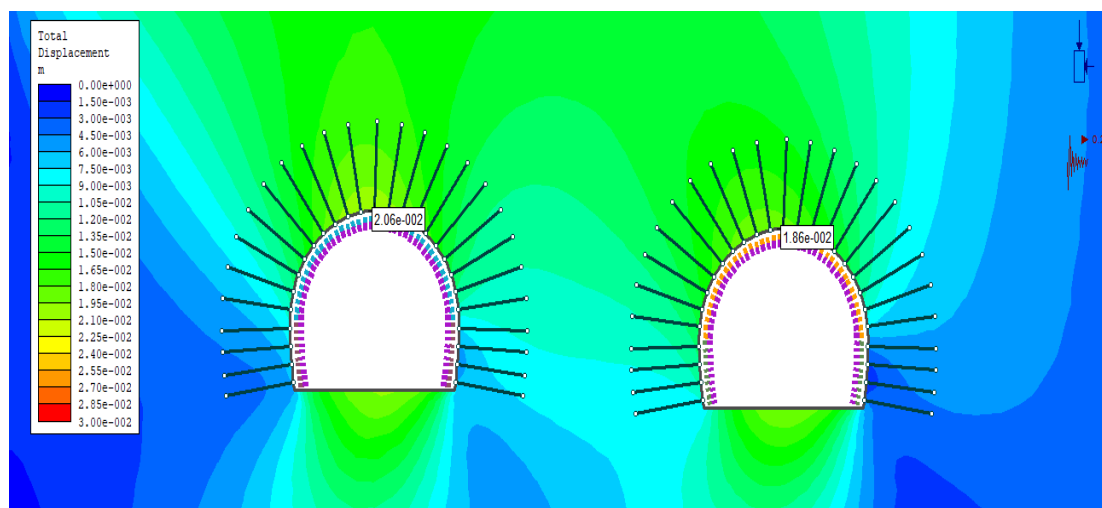
- Οροφή: 10 mm (αριστερός κλάδος), 9,33 mm (δεξιός κλάδος)
- Δάπεδο: 8,84 mm (αριστερός κλάδος), 8,98 mm (δεξιός κλάδος)
- Τοιχώματα: 3,87 mm (αριστερός κλάδος), 5,99 mm (δεξιός κλάδος)



Σχήμα 9.153. Ολικές μετατοπίσεις (κατηγορία εδάφους I – δίδυμη σήραγγα)

➤ **Κατηγορία II (για δίδυμη σήραγγα)**

- Οροφή: 20.6 mm (αριστερός κλάδος), 18.6 mm (δεξιός κλάδος)
- Δάπεδο: 19.6 mm (αριστερός κλάδος), 19.4 mm (δεξιός κλάδος)
- Τοιχώματα: 8.75 mm (αριστερός κλάδος), 12.7 mm (δεξιός κλάδος)



Σχήμα 9.154. Ολικές μετατοπίσεις (κατηγορία εδάφους II – δίδυμη σήραγγα)

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται οι ολικές μετατοπίσεις στην οροφή, στο δάπεδο και στα τοιχώματα για όλες τις προηγούμενες αναλύσεις σήραγγων που έχουν πραγματοποιηθεί.

Πίνακας 9.20, Ολικές μετατοπίσεις για μονή σήραγγα υπό σεισμική φόρτιση (όλες οι κατηγορίες)

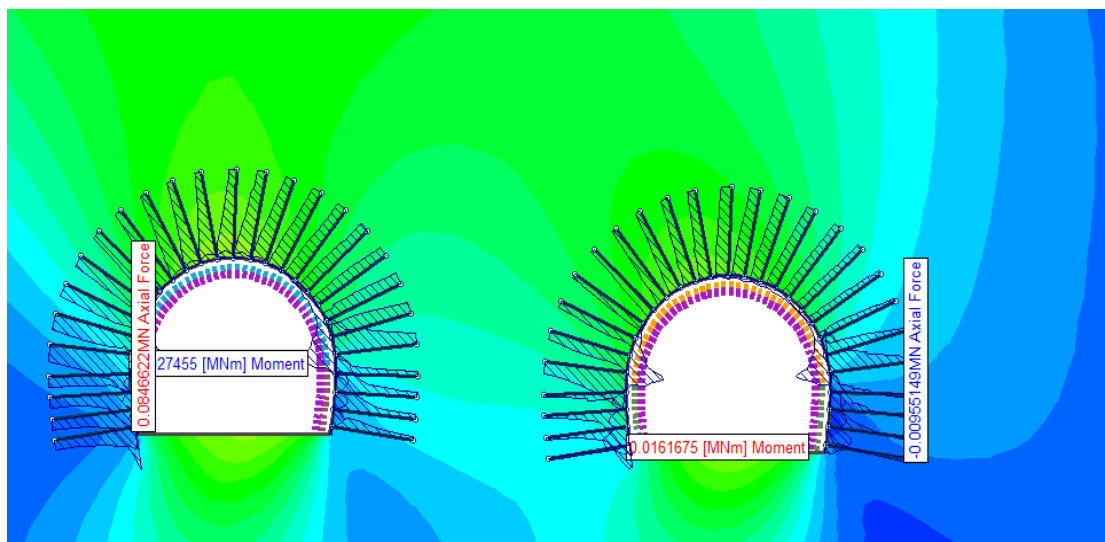
Ολικές μετατοπίσεις με σεισμικές συνθήκες (mm)	u (mm) οροφή	u (mm) δάπεδο	u (mm) τοιχώματα
Κατηγορία εδάφους I	8,54	9,53	4,81
Κατηγορία εδάφους II	17,5	20,8	10,4
Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα)	15	7,95	6,54
Κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα)	29,6	23,5	16,6
Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα υπο κλίση)	17,2	15,4	10,3
Κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα υπο κλίση)	32,9	20,9	18,7

Πίνακας 9.21. Ολικές μετατοπίσεις για δίδυμη σήραγγα υπό σεισμική φόρτιση (όλες οι κατηγορίες)

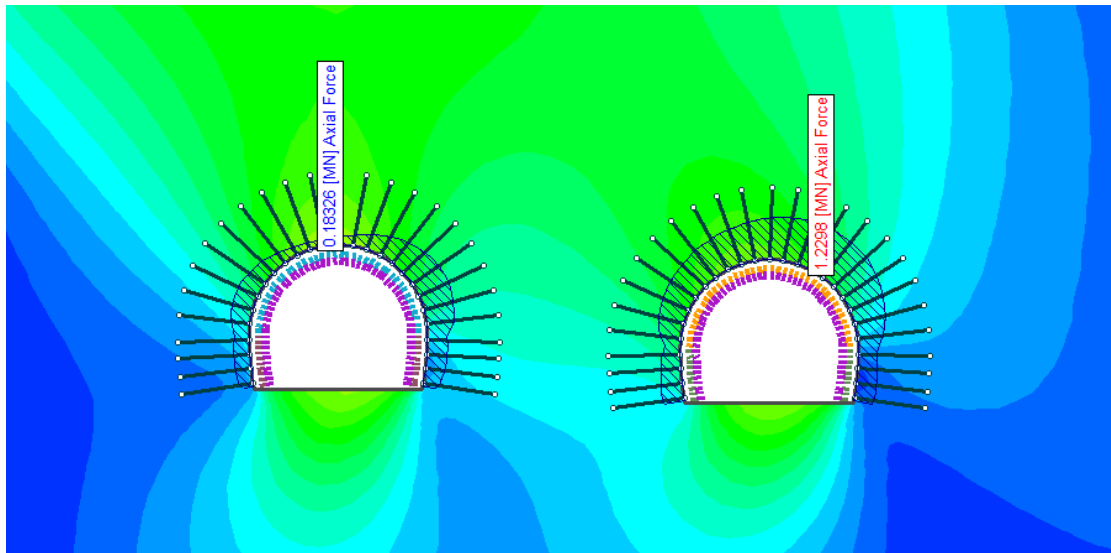
Ολικές μετατοπίσεις με σεισμικές συνθήκες (mm)	Αριστερός κλάδος				Δεξιός κλάδος			
	u_y (mm) οροφή	u_y (mm) δάπεδο	u_y (mm) αριστερή παρειά	u_y (mm) δεξιά παρειά	u_y (mm) οροφή	u_y (mm) δάπεδο	u_y (mm) αριστερή παρειά	u_y (mm) δεξιά παρειά
Κατηγορία εδάφους I	10	9	3,87	3,44	9,33	8,98	5,99	2,16
Κατηγορία εδάφους II	20,6	19,6	8,75	8,08	18,6	19,4	12,7	5,58
Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα)	16,2	7,57	4,81	3,82	15	7,55	6,82	2,65
Κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα)	33,6	22,8	14,7	13,9	31,1	21,9	20,3	11,3

9.6.2 Καταπόνηση μέτρων άμεσης υποστήριξης με σεισμικές συνθήκες

➤ Κατηγορία II (για δίδυμη σήραγγα)



Σχήμα 9.155. Αξονικές δυνάμεις αγκυρίων και καμπτικές ροπές εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II)



Σχήμα 9.156. Αξονικές δυνάμεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Κατηγορία εδάφους II)

- Μέγιστη αξονική δύναμη αγκυρίου: 85 kN
- Μέγιστη αξονική δύναμη εκτοξευόμενου σκυροδέματος: 1230 kN
- Μέγιστη καμπτική ροπή εκτοξευόμενου σκυροδέματος: 27 kNm

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται οι καταπονήσεις των μέτρων αντιστήριξης για όλες τις περιπτώσεις σηράγγων που μελετήθηκαν.

Πίνακας 9.22. Καταπόνηση μέτρων υποστήριξης υπό σεισμική φόρτιση – μονή σήραγγα

Καταπονήσεις μέτρων αντιστήριξης με σεισμικές συνθήκες	Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα		Αγκύρια
	N _{max} (kN)	M _{max} (kNm)	N _{max} (kN)
Κατηγορία εδάφους I	743.2	8.6	38.3
Κατηγορία εδάφους II	968.5	22.6	87
Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα)	1064.9	15.6	73.3
Κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα)	1243.5	33.4	122.3
Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα υπο κλίση)	1038.2	20.8	98.6
Κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα υπο κλίση)	1429.5	34.2	170.4

Πίνακας 9.23. Καταπόνηση μέτρων υποστήριξης υπό σεισμική φόρτιση – δίδυμη σήραγγα

Καταπονήσεις μέτρων αντιστήριξης με σεισμικές συνθήκες (δίδυμη σήραγγα)	Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα		Αγκύρια
	N _{max} (kN)	M _{max} (kNm)	N _{max} (kN)
Κατηγορία εδάφους I	921.9	4.8	58.3
Κατηγορία εδάφους II	1229.8	16.2	84.7
Κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα)	1248.9	13.6	67.6
Κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα)	1516	38.6	125.2

10. Συμπεράσματα

10.1 Προσομοίωση ανυποστήρικτης σήραγγας

Flac 7.0

Παρατηρείται ότι στις κατηγορίες εδάφους I και II (ενιαίο στρώμα εδάφους) η μεγαλύτερη κατακόρυφη σύγκλιση προκαλείται στο δάπεδο του εδάφους (ανύψωση) και όχι στην οροφή της σήραγγας (καθίζηση). Υπό την επίδραση της στρωματογραφίας παρατηρείται μεγαλύτερη καθίζηση στην οροφή σε σύγκριση με την ανύψωση του δαπέδου. Οριζόντιες μετατοπίσεις μετρήθηκαν μόνο στα τοιχώματα της σήραγγας, ενώ στην οροφή και στο δάπεδο της οι τιμές τους ήταν μηδενικές.

Για την κατηγορία εδάφους I παρατηρήθηκαν ιδιαίτερα χαμηλά μεγέθη συγκλίσεων. Στις διατομές κατηγορία εδάφους II, κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα) και κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα υπό κλίση) παρατηρήθηκαν μετρίου μεγέθους συγκλίσεις, ενώ σημαντικές συγκλίσεις προέκυψαν για τις διατομές κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα) και κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα υπό κλίση), όπου οι εδαφικοί σχηματισμοί που επιλέχθηκαν έχουν φτωχότερες ιδιότητες.

Όσον αφορά την πλαστικοποιημένη περιοχή, παρατηρούμε ότι για βραχύμαζα καλής ποιότητας οι πλαστικές παραμορφώσεις είναι σχετικά περιορισμένες, ενώ όσο χειροτερεύει η ποιότητα της βραχύμαζας τόσο πιο έντονες γίνονται, ενώ παράλληλα μεγαλώνει η ακτίνα της πλαστικοποιημένης ζώνης. Πιο συγκεκριμένα για την κατηγορία I παρατηρείται πολύ μικρή ακτίνα πλαστικοποίησης και το μέσο συμπεριφέρεται σχεδόν ελαστικά. Σε όλες τις διατομές παρατηρήθηκε μεγαλύτερη ακτίνα πλαστικοποίησης στα τοιχώματα από ότι στην οροφή, καθώς η πλαστικοποιημένη περιοχή σε όλες τις διατομές αναπτύσσεται κυρίως στα τοιχώματα και στο δάπεδο.

Phase² 8.0

Παρατηρείται ότι για όλες τις κατηγορίες εδάφους, η μεγαλύτερη κατακόρυφη σύγκλιση προκαλείται στην οροφή της σήραγγας (καθίζηση), ενώ στο δάπεδο της παρατηρείται μικρότερη σε μέγεθος ανύψωση. Οριζόντιες μετατοπίσεις μετρήθηκαν μόνο στα τοιχώματα της σήραγγας, ενώ στην οροφή και στο δάπεδο της οι τιμές τους ήταν μηδενικές.

Όσον αφορά τις συγκλίσεις που προέκυψαν, οι πιο σημαντικές εμφανίζονται στην οροφή της σήραγγας για κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα υπό κλίση) και κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα), ενώ ιδιαίτερα χαμηλά μεγέθη συγκλίσεων παρατηρήθηκαν στην κατηγορία εδάφους I. Η κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα) και η κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα υπό κλίση) παρουσίασαν μετρίου μεγέθους συγκλίσεις.

Σε όλους τους εδαφικούς σχηματισμούς που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία η ακτίνα πλαστικοποίησης στην οροφή είναι σχεδόν μηδενική. Οι πλαστικοποιημένες περιοχές που προέκυψαν, αναπτύσσονται κυρίως στις παρειές. Η κατηγορία εδάφους II (3-στρώματα υπό κλίση) παρουσιάζει έντονες πλαστικές παραμορφώσεις, ενώ στην κατηγορία εδάφους I παρατηρείται πάρα πολύ μικρή ακτίνα πλαστικοποίησης και το μέσο συμπεριφέρεται σχεδόν ελαστικά. Στην κατηγορία εδάφους II (2-στρώματα) η πλαστικοποιημένη ζώνη εμφανίζεται ιδιαίτερα στις παρειές της σήραγγας (σχήμα πεταλούδας).

10.2 Προσομοίωση διάνοιξης σήραγγας με εφαρμογή μέτρων άμεσης υποστήριξης

Η προσομοίωση των σταδίων διάνοιξης και κατασκευής της σήραγγας με την χρήση των προγραμμάτων FLAC 7.0 και PHASE² 8.0 βρίσκεται σε πλήρη συνάφεια με την διαδικασία υλοποίησης του έργου με βασικούς άξονες τις φάσεις εκσκαφής, τη σταδιακή αποτόνωση του εδάφους και την τοποθέτηση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης του έργου.

Από την προσομοίωση της διάνοιξης και προσωρινής υποστήριξης της σήραγγας στο περιβάλλον εργασίας των δύο προγραμμάτων προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Οι συγκλίσεις μετά την τοποθέτηση των μέτρων άμεσης υποστήριξης μειώθηκαν σημαντικά.
- Όσον αφορά την καταπόνηση των μέτρων υποστήριξης, φαίνεται να είναι μεγαλύτερη όσο χειρότερη είναι η ποιότητα της βραχώμαζας. Οι τιμές της καμπτικής ροπής είναι μικρές, ενώ οι μεγαλύτερες τιμές των αξονικών δυνάμεων των αγκυρίων εμφανίζονται στην παρειά της σήραγγας, χωρίς όμως να υπερβαίνουν τα 200 kN που είναι η φέρουσα ικανότητα των αγκυρίων. Στην κατηγορία διατομής B παρατηρείται ότι τα κατώτερα αγκύρια παρουσιάζουν πολύ μικρές τιμές αξονικών δυνάμεων.
- Οι πλαστικοποιημένες περιοχές που αναπτύχθηκαν μετά την εφαρμογή των μέτρων αντιστήριξης εμφανίζονται στις παρειές της σήραγγας και στο δάπεδο. Παρατηρείται ότι σε καμία από τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν δεν εμφανίζεται η ύπαρξη πλαστικών παραμορφώσεων στην οροφή της σήραγγας.

Σχετικά με την τοποθέτηση μέτρων υποστήριξης στο δάπεδο παρατηρείται ότι μετά την εφαρμογή τους οι τιμές των κατακόρυφων μετατοπίσεων και των αξονικών δυνάμεων των αγκυρίων και του εκτοξευόμενου σκυροδέματος δεν διαφοροποιούνται. Παρουσιάζεται μικρή μείωση της ζώνης πλαστικοποίησης στο δάπεδο και στις παρειές. Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα που προέκυψαν, η τοποθέτηση μέτρων υποστήριξης στο δάπεδο δε συμβάλλει σημαντικά στην ευστάθεια της σήραγγας, καθώς οι διαφορές είναι αμελητέες.

10.3 Προσομοίωση διάνοιξης δίδυμης σήραγγας

Από την προσομοίωση της διάνοιξης δίδυμης σήραγγας και προσωρινής υποστήριξης της στο περιβάλλον εργασίας των δύο προγραμμάτων προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Παρατηρείται ότι ο δεξιός κλάδος της σήραγγας εμφανίζει ελαφρώς πιο αυξημένες συγκλίσεις. Οι συγκλίσεις φαίνονται να είναι μεγαλύτερες όσο φτωχότερη είναι η ποιότητα της βραχώμαζας και πάλι όμως δεν παρατηρούνται ιδιαίτερα αυξημένες συγκλίσεις, έτσι ώστε να διαταράσσουν την ευστάθεια της σήραγγας.
- Η καταπόνηση των μέτρων υποστήριξης, φαίνεται να είναι μεγαλύτερη όσο χειρότερη είναι η ποιότητα της βραχώμαζας. Οι τιμές της καμπτικής ροπής είναι μικρές, ενώ οι μεγαλύτερες τιμές των αξονικών δυνάμεων των αγκυρίων εμφανίζονται στην παρειά της σήραγγας, χωρίς όμως να υπερβαίνουν τα 200 kN που είναι η φέρουσα ικανότητα των αγκυρίων. Στην κατηγορία διατομής B παρατηρείται ότι τα κατώτερα αγκύρια παρουσιάζουν πολύ μικρές τιμές αξονικών δυνάμεων.
- Όπως φαίνεται από τις πλαστικοποιημένες περιοχές που αναπτύχθηκαν στις παρειές και στο δάπεδο κάθε κλάδου, δεν υπάρχει σημαντική αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο σηράγγων.

10.4 Προσομοίωση διάνοιξης σήραγγας με σεισμικές συνθήκες

Η προσομοίωση με σεισμικές συνθήκες πραγματοποιήθηκε με χρήση του προγράμματος Phase² 8.0 . Οι σεισμικές συνθήκες εφαρμόστηκαν στο τελευταίο στάδιο της εκσκαφής και πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις διάνοιξης μονής και δίδυμης σήραγγας.

Όσον αφορά την προσομοίωση των μονών σηράγγων παρατηρείται μικρή αύξηση των συγκλίσεων και αύξηση των αξονικών δυνάμεων του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Οι αξονικές δυνάμεις των αγκυρίων δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερη μεταβολή.

Οι συγκλίσεις που προέκυψαν από την προσομοίωση δίδυμης σήραγγας υπό σεισμικές συνθήκες αυξήθηκαν, αλλά παραμένουν μετρίου μεγέθους. Ιδιαίτερη αύξηση παρουσιάστηκε στις αξονικές δυνάμεις του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Αξίζει να αναφερθεί ότι γενικά, τα υπόγεια τεχνικά έργα θεωρούνται ασφαλέστερα από τα επιφανειακά έναντι σεισμικής δράσης, εκτός από τις περιπτώσεις όπου διατέμνονται από ενεργό ρήγμα. Σημειώνεται ότι το Phase² 8.0 δεν παρέχει τη δυνατότητα εισαγωγής άλλων σεισμικών παραμέτρων, όπως το μήκος του σεισμικού κύματος.

11. Βιβλιογραφία / Ιστογραφία

1. Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum B,. (2002). Hoek-Brown failure criterion. Proceedings of the North American Rock Mechanics Society Meeting. Toronto, Canada.
2. Hoek, E. (14-19 March,1999). Support for very weak rock associated with faults and shear zones. Distinguished lecture for the opening of the International Symposium on Rock Support and Reinforcement, Practice in Mining. Kalgoorlie, Australia.
3. Hoek, E., and Brown, E.T. (1994). Underground Excavations in Rock. Spon Press (Taylor and Francis Ltd).
4. ITASCA Consulting Group. (2018). Inc. FLAC Fast Lagrangian Analysis of Continua: Flac Version 7.0, Online Manual Table of Contents.
5. Rocscience Inc. . (2018). Phase2: User's Manual. Ontario, Canada.
6. Kolymbas, Dimitrios. (2005). Tunneling and Tunnel Mechanics.
7. Muirwood, D. (1990). Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics. Cambridge: University Press.
8. Shutz, Reinhard. (2010). Numerical Modelling of Shotcrete for Tunneling. London: Thesis, Imperial College London.
9. Εγνατία οδός Α.Ε. (2011). Έκθεση γεωλογικής γεωτεχνικής αξιολόγησης. Τεχνική Έκθεση.
10. Εγνατία οδός Α.Ε. (2011). Μελέτη εκσκαφής και προσωρινής υποστήριξης. Τεχνική Έκθεση.
11. Εξαδάκτυλος Γ., Σταυροπούλου Μ. (2006). Κατασκευή και Μηχανική των Σηράγγων και των Υπογείων Έργων. Χανιά: Πανεπιστημιακές σημειώσεις Πολυτεχνείου Κρήτης.
12. Καββαδάς, Μ. (2005). Σημειώσεις Σχεδιασμού Υπόγειων Έργων. Έκδοση Ε.Μ.Π.
13. Κυριόπουλος, Κ., Τσιριμώκος, Α.,. (2016). Προσομοίωση διάνοιξης σήραγγας της ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ Α.Ε. και παραμετρική ανάλυση ευστάθειας με χρήση αριθμητικών μεθόδων. Βόλος: Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
14. Κωμοδρόμος, Α. (2008). Υπολογιστική Γεωτεχνική Μηχανική. Αθήνα: Κλειδάριθμος.
15. Μαραγκός, Χ. (1997). Τεχνικά Έργα Υποδομής. Μαραγκός Χ.
16. Μπέης, Α. (2017). Προσομοίωση διάνοιξης σήραγγας και μελέτη της επίδρασης του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων στην ευστάθειά της με τη

χρήση αριθμητικών μεθόδων. Βόλος: Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

17. Μπρόκος, Γ. (2011). Παραμετρική διερεύνηση υποστήριξης σήραγγας σε διαφορετικούς εδαφικούς σχηματισμούς. Χανιά, Κρήτη: Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης.
18. Ντιούδη, Α. (2010). Παραμετρική Διερεύνηση μέτρων υποστήριξης οδικής σήραγγας με αριθμητικό προσομοίωμα. Χανιά, Κρήτης: Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης.
19. Ρόζος. (1989). Εγχειρίδιο Τεχνικής Γεωλογίας 1. Ηλεκτρονικές σημειώσεις, ΕΜΠ.
20. Σοφιανός Α.Ι. (2012). Μεταλλικά Πλαίσια. Αθήνα: Πανεπιστημιακές σημειώσεις Ε.Μ.Π.
21. ekkafe. (2016). http://ekkafe.gr/online_files/Brochure_Soil_Nails_gr.pdf.
22. http://www.rocscience.com/help/phase2/webhelp/tutorials/Phase2_Tutorials.htm. (2018).
23. www.dr-sauer.com. (2018).
24. www.railsystem.net/natm/. (2018). Ανάκτηση από <http://www.railsystem.net/natm/>