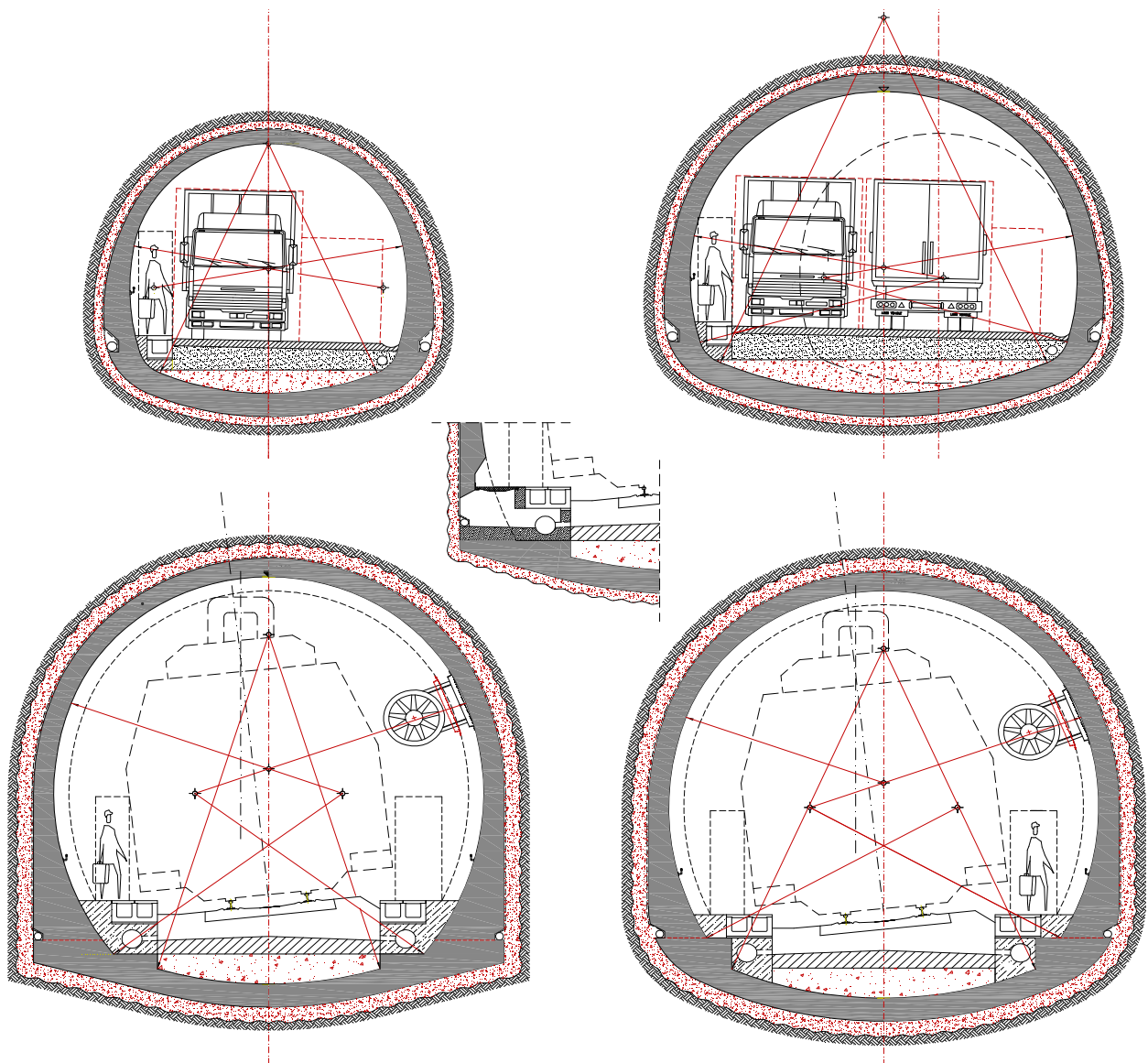




Τ.Ε.Ι. ΠΑΤΡΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ : ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

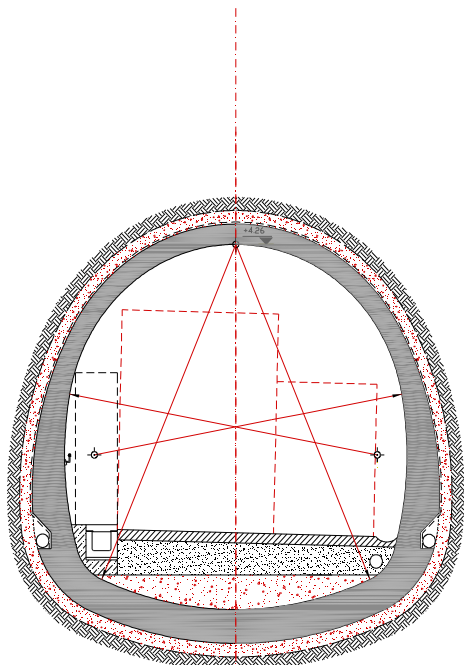
Σχεδιασμός, Υπολογιστική Προσέγγιση &
Κατασκευαστικά Στοιχεία Των Σηράγγων



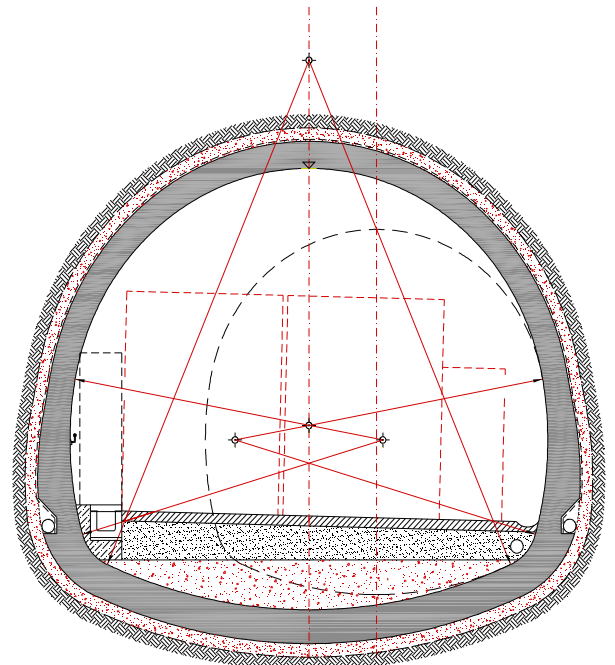
Λεωνίδας Τζεβελέκας
Βγενοπούλου

ΕΙΣΗΓΗΤΡΙΑ : Δρ Ειρήνη

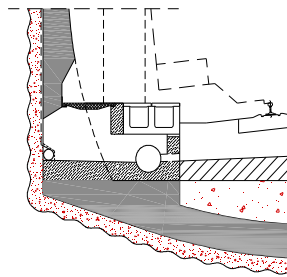
ΠΑΤΡΑ 2007



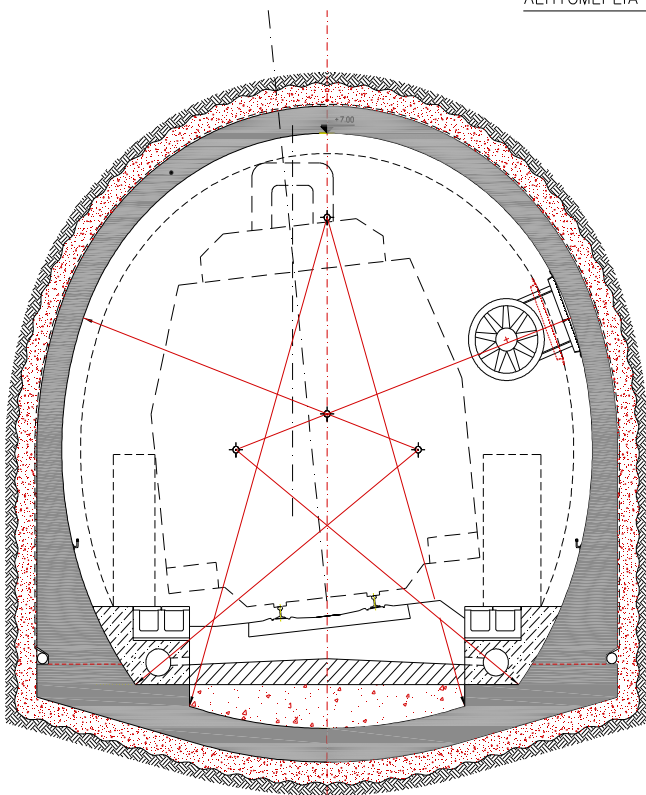
ΤΥΠΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΔΙΑΦΥΓΗΣ



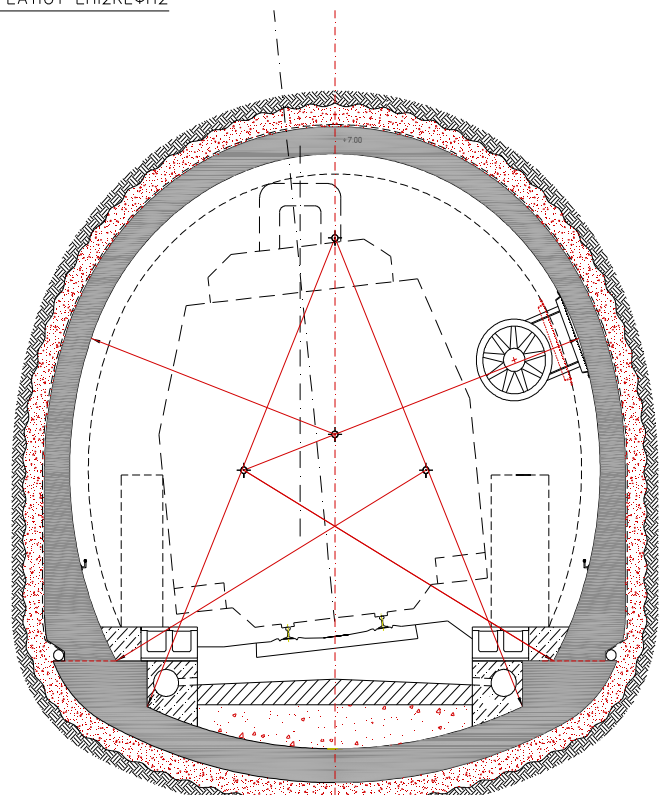
ΤΥΠΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ ΔΙΕΥΡΥΜΕΝΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΔΙΑΦΥΓΗΣ



ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΑ ΣΕ ΘΕΣΗ ΦΡΕΑΤΙΟΥ ΕΠΙΣΚΕΨΗΣ



ΤΥΠΙΚΗ ΤΟΜΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΜΕ ΕΥΜΕΝΗ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡ/ΚΑ



ΤΥΠΙΚΗ ΤΟΜΗ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΜΕ ΔΥΣΜΕΝΗ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡ/ΚΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Είμαι ευγνώμων στην καθηγήτρια κ. Βγενοπούλου Ειρήνη, επιβλέπων της πτυχιακής εργασίας, για την υποστήριξη, την καθοδήγηση, τις πολύτιμες συμβουλές της καθώς και για τις χρήσιμες γνώσεις που προσέφερε, προς την ολοκλήρωση της εργασίας, καθ' όλη την διάρκεια σύνταξης της εργασίας .

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Σελίδα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΤΟ ΥΠΟΓΕΙΟ ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΡΓΟ : ΣΗΡΑΓΓΑ

1.1	Ιστορική αναδρομή στην εμφάνιση των πρώτων υπόγειων έργων.....	8
1.2	Σκοπιμότητα κατασκευής ενός υπόγειου έργου.....	10
1.3	Κατηγορίες υπόγειων έργων & κριτήρια επιλογής της διατομής αυτών.....	11

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΜΕΛΕΤΗ ΧΑΡΑΞΗΣ ΤΟΥ ΑΞΟΝΑ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ .

ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ

2.1	Η επίδραση του ελεύθερου χώρου εντός της σήραγγας.....	17
2.2	Η επίδραση της φύσης του εδάφους που διασχίζει την σήραγγα.....	18
2.3	Οριζόντια χάραξη σήραγγας.....	21
2.3.1	Χάραξη σήραγγας, μικρού μήκους.....	21
2.3.2	Χάραξη σήραγγας, μεγάλου μήκους, με αναφορά στο τριγωνομετρικό δίκτυο (triangulation) της περιοχής.....	23
2.3.3	Χάραξη σήραγγας, μεγάλου μήκους, με αναφορά ενός ίδιου δικτύου σταθερών σημείων.....	25
2.4	Χάραξη Ύψους.....	29
2.5	Μέτρηση της θέσης της εσωτερικής επένδυσης της σήραγγας.....	30

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΦΟΡΤΙΩΝ

ΣΕ ΕΛΔΑΦΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

3.1 Προσδιορισμός των εδαφικών πιέσεων της σήραγγας.....	33
3.1.1 Αίτια και μορφές των εδαφικών πιέσεων, επί της οροφής της σήραγγας.....	33
3.2 Μέθοδοι προσεγγιστικού προσδιορισμού των εδαφικών πιέσεων.....	35
3.3 Θεωρίες υπολογισμού των εδαφικών πιέσεων, βάσει διαφόρων παραδοχών, που λαμβάνουν υπόψη την επίδραση του βάθους.....	38
3.3.1 Θεωρία Bierbanker	38
3.3.2 Θεωρία Eszro	39
3.3.3 Θεωρία Terzaghi	42
3.3.4 Θεωρία A.Balla	46
3.3.5 Θεωρία Suquet	48
3.4 Θεωρίες υπολογισμού των εδαφικών πιέσεων, βάσει διαφόρων παραδοχών, που δεν λαμβάνουν υπόψη την επίδραση του βάθους.....	50
3.4.1 Θεωρία Kommerell	50
3.4.2 Θεωρία Protodjakonows	51
3.5 Προσδιορισμός των πλευρικών πιέσεων της σήραγγας.....	53
3.5.1 Προσεγγιστικός προσδιορισμός των πλευρικών πιέσεων.....	53
3.5.2 Ακριβέστερος προσδιορισμός των πλευρικών πιέσεων, μέσω πρότυπων πειραμάτων και μετρήσεων, στα ήδη κατασκευασθέντα υπόγεια έργα.....	55
3.5.3 Υπολογισμός των πλευρικών πιέσεων κατά Engesser	56
3.6 Προσδιορισμός των πιέσεων επί των θεμελίων της σήραγγας.....	58
3.6.1 Υπολογισμός των πιέσεων επί των θεμελίων κατά Zimburjewitsch	58
3.6.2 Υπολογισμός των πιέσεων επί των θεμελίων κατά Terzaghi	61
3.6.3 Υπολογισμός των πιέσεων επί των θεμελίων κατά Protodjakonows	63
3.6.4 Υπολογισμός των πιέσεων επί των θεμελίων κατά Zimbariewitsch	64
3.7 Μέθοδοι μέτρησης των ενασκούμενων πιέσεων της σήραγγας.....	66
3.7.1 Στην κοιλιά της σήραγγας κατά Talobre	66
3.7.2 Στην στηρίζουσα επίστρωση της σήραγγας.....	68

3.8	Μέτρηση των ενασκούμενων δυνάμεων επί των πλευρικών τοίχων της σήραγγας..	69
3.9	Υπολογισμός της εσωτερικής επένδυσης της σήραγγας.....	72
3.10	Διαστασιολόγηση τελικής επένδυσης σήραγγας.....	78
3.11	Διαστασιολόγηση διατομής σήραγγας.....	79
3.12	Κανόνες παραδοχής φορτίων για τα υπόγεια έργα.....	80
3.12.1	Αρχές εύρεσης των φορτίων, για βαθιά κείμενη σήραγγα, σε στερεό βράχο..	80
3.12.2	Αρχές εύρεσης των φορτίων, για διανοιγόμενη σήραγγα, παρά την επιφάνεια διαβραχέντων χαλαρών εδαφών.....	82
3.12.3	Κανόνες εύρεσης των φορτίων για την υπόγεια σιδηροδρομική σήραγγα της Λισσαβόνας.....	82
3.12.4	Κανόνες εύρεσης των φορτίων για την υπόγεια σιδηροδρομική σήραγγα της Βουδαπέστης.....	84
3.12.5	Γενικοί κανόνες εύρεσης των φορτίων και μετρήσεων, για υπόγεια σιδηροδρομικά και οδικά έργα.....	85

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

4.1	Μέθοδοι διάνοιξης σήραγγας.....	87
4.1.1	Η τεχνική των εκρήξεων (Drill & Blast).....	88
4.1.2	Διάνοιξη με συνδυασμό εκρηκτικών υλών - μηχανικών μέσων.....	90
4.2	Φάσεις εκσκαφής σήραγγας.....	91
4.4	Διάνοιξη σήραγγας σε χαλαρά εδάφη, με εκτέλεση της διάνοιξης από την επιφάνεια του εδάφους – Ανοικτή τάφρος.....	97

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΩΝ

ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

5.1 Υποστήριξη της διανοιγόμενης σήραγγας.....	101
5.1.1 Προήγηση των στοιχείων της άμεσης υποστήριξης.....	103
5.1.2 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα – Αγκύρια βράχου.....	105
5.1.3 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα – Μεταλλικά πλαίσια.....	105
5.2 Στεγανοποιητικός φορέας της σήραγγας.....	106
5.2.1 Υδρομαστευτική στρώση.....	108
5.2.2 Στεγανοποιητική στρώση.....	109
5.3 Αποστράγγιση υπόγειου ανοίγματος κατά τη φάση της όρυξης.....	111
5.3.1 Άντληση υπόγειου ύδατος.....	113
5.3.2 Υδρομάστευση σε περιοχές μεγάλης υδροφορίας.....	113
5.3.3 Στεγάνωση των μετώπων εισόδου της σήραγγας.....	114
5.4 Αερισμός της σήραγγας κατά την διάνοιξη αυτής.....	114
5.4.1 Αερισμός των μετώπων εισόδου κατά την διάρκεια κατασκευής.....	116
5.4.2 Αερισμός κατά την εκσκαφή με συμβατικά μέσα.....	116
5.4.3 Αερισμός κατά την εκσκαφή με μηχανικά μέσα.....	118
5.4.4 Υπολογισμός της απαιτούμενης παροχής (Q_0).....	119
5.4.5 Υπολογισμός της πτώσης πίεσης (h_0).....	119
5.4.6 Υπολογισμός της δυναμικής πίεσης (h_d).....	119
5.5 Βοηθητικές κατασκευές της σήραγγας.....	120

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΑΝΑΦΟΡΕΣ



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Το Υπόγειο Τεχνικό Έργο : Σήραγγα

1.1 Ιστορική Αναδρομή Στην Εμφάνιση Των Πρώτων Υπόγειων Έργων

Η ανθρώπινη ιστορία έχει συνδεθεί με διάφορες φάσεις ανάπτυξης της χρήσης υπόγειου διαστήματος από την αρχή της . Παραδείγματος χάριν, είναι δυνατό να προσδιοριστεί η εποχή των τάφων στην Αίγυπτο, η οποία άρχισε **5000** χρόνια πριν, κατόπιν, η εποχή των μεταλλείων **4000** χρόνια πριν και η εποχή των καναλιών στην

Ευρώπη, κατά τη διάρκεια του **1600** .

Κατά τη διάρκεια του **19^{ου}** αιώνα, ήταν η εποχή των σιδηροδρόμων, όπου οι μηχανικές μέθοδοι διάνοιξης είχαν κόστος που οδηγούσε στη χρεοκοπία την Ευρώπη και τη Βόρεια Αμερική . Τα παραδείγματα μεθόδων και οι τεχνολογίες αυτής της εποχής είναι οι κλασικές μέθοδοι διάνοιξης (*Αυστριακές, Βελγικές, Αγγλικές, Γερμανικές και Ιταλικές μέθοδοι διάνοιξης*), η πρώτη ασπίδα (**1818**), υδραυλικές και αεροκίνητες μηχανές και εργαλεία (**1857**), η εφεύρεση του δυναμίτη (**1864**) και η χρήση του συμπιεσμένου αέρα (**1869**) . Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, οι σημαντικότερες προκλήσεις της διάνοιξης σιδηρόδρομων αφορούσαν τις τεχνικές πτυχές και τις πτυχές ασφάλειας, γεγονός που οδήγησε στην ανάπτυξη των κλασικών μεθόδων διάνοιξης .



Οι πρώτες προσπάθειες για μηχανοποιημένη διάνοιξη σιδηρόδρομων μέσω της **χρήσης μηχανών ασπίδων** προήλθαν από τον **Marc Brunel** όταν είδε τις τρύπες που άνοιξε το σαράκι στο κατώτατο σημείο ενός σκάφους . Μετέπειτα, το **1818**, του χορηγήθηκε ένα δίπλωμα ευρεσιτεχνίας και άρχισε τη σήραγγα του Τάμεση στο Λονδίνο το **1825** .

Η βασική ιδέα του ήταν να σπρώξει ένα άκαμπτο πλαίσιο (ασπίδα), ορθογώνιου διατομής, προς τα εμπρός με γρύλους, αποτρέποντας κατά συνέπεια το έδαφος από την κατάρρευση και έτσι να χτίσει τη σήραγγα μέσα στα πλαίσια . Με επανάληψη της διαδικασίας και έπειτα κατασκευάζοντας την υποστήριξη, η σήραγγα θα προχωρούσε προς τα εμπρός .



Αυτή ήταν η πρώτη Ασπίδα Ανοικτού Μετώπου (**Open Face Shield - OFS**) και εφευρέθηκε από τον **Marc Brunel** το **1825** για μια σήραγγα πλάτους **11.60 m**, ύψους **6.70 m** και μήκους **365 m**, κάτω από τον ποταμό Τάμεση της οποίας η κατασκευή διήρκησε **20** χρόνια, από το **1825** έως το **1845** .

Η ανασκόπηση στην ιστορία ανάπτυξης των μηχανημάτων ολομέτωπης διάνοιξης σιδηρόδρομων (**Tunnel Boring Machines - TBM**) δείχνει ότι τα θεμέλια είχαν ήδη τεθεί κατά τον περασμένο αιώνα από τον **C. Whilson**, με μηχανήμα που εφευρέθηκε το **1856** και δοκιμάστηκε στη σήραγγα **Hooasc** της Μασαχουσέτης (**ΗΠΑ**) . Κάποιοι άλλοι ισχυρισμοί λένε ότι η πρώτη προσπάθεια διάνοιξης σήραγγας με TBM ήταν με τη χρήση δύο μηχανών **Beaumont - English 7** ποδιών (**2.13 m**) από το **1881** έως **1882** . Αυτή ήταν μια γενναία προσπάθεια κατασκευής μιας σήραγγας για την κυκλοφορία αλόγων και για τις μεταφορές εγκάρσια στο αγγλικό κανάλι (**English Channel**) .

Οι μεταλλωρύχοι της εποχής έφθασαν σε εντυπωσιακά μεγέθη **1.883 m** από την αγγλική πλευρά και **1.663 m** από τη γαλλική πλευρά προτού να αποσύρει το βρετανικό Κοινοβούλιο την υποστήριξη και τα χρήματα λόγω έλλειψης δημόσιας υποστήριξης . Φημολογήθηκε ότι στην πραγματικότητα η βρετανική κίνηση σταμάτησε για το λόγο ότι

υπήρχαν φόβοι ότι μια ολοκληρωμένη σήραγγα θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως μέσο γαλλικής εισβολής .



Θα έπαιρνε περισσότερο από **115** χρόνια ή περίπου τόσο προτού να επιτευχθεί ο άθλος που με τον σημερινό καλύτερο προγραμματισμό και τη σύγχρονη τεχνολογία η μέθοδος να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ικανοποιητικά .

Μετά την πρώτη προσπάθεια με μια μηχανή διάνοιξης σηράγγων (*TBM*) από τους Άγγλους αρκετές δεκαετίες πέρασαν πριν ο **Dick Robbins (ΗΠΑ)**, αναπτύξει και κατασκευάσει την πρώτη εμπορικά διαθέσιμη **μηχανή διάνοιξης σηράγγων για σκληρό βράχο το 1951** .

Οι μηχανές σήμερα έχουν ακόμα τη ίδια βασική αρχή σχεδιασμού, που αποτελείται από μια περιστρεφόμενη κεφαλή κοπής που είναι κολλημένη σε ένα κεντρικό άξονα και από τα έμβολα ώθησης (*ripper pads*) που με ειδικές πένσες γαντζώνουν τον τοίχο της σήραγγας για να οδηγήσουν τη μηχανή μπροστά .

Από τότε **Shielded** (μηχανές με ασπίδα), **Double Shielded** (διπλής ασπίδας), **Slurry** (μηχανές που χρησιμοποιούν πηλό ή υγρά για υποστήριξη), μηχανές εξισορρόπησης της γήινης πίεσης (**Earth Pressure Balance – EPB**), μηχανές διάνοιξης σηράγγων *TBM* έχουν αναπτυχθεί από διάφορες επιχειρήσεις για να οδηγήσουν σε κατασκευή σηράγγων σε όλα τα είδη των εδαφών .



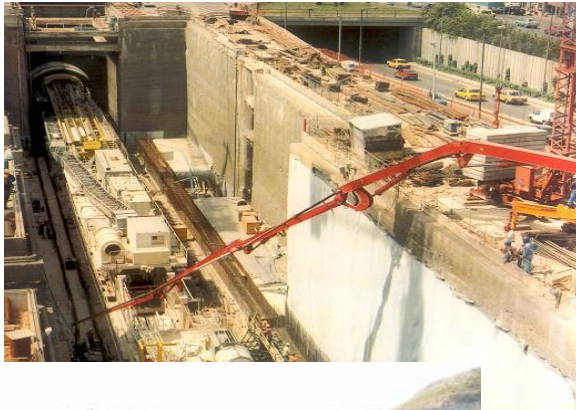
1.2 Σκοπιμότητα Κατασκευής Ενός Υπόγειου Έργου

Με τον όρο **σήραγγα** εννοούμε εκείνο το τεχνικό έργο το οποίο κατασκευάζεται με διάτρηση υπό μορφή υπόγειου ορύγματος σε πάρα πολύ μεγάλα βάθη σε σχέση με την επιφάνεια του εδάφους .

Το συγκεκριμένο κατασκευαστικό έργο υποδομής, φέρει μια είσοδο και μια έξοδο που καθορίζονται από τη φορά χιλιομέτρησης του βασικού άξονα οδοποιίας και κατασκευάζονται καθαρά για λόγους αντιστήριξης των πρανών αυτής . Ο κάθε κλάδος, όμως, έχει τη δική του είσοδο και έξοδο, όπου το κριτήριο για τον καθορισμό του καθενός αποτελεί η φορά κατεύθυνσης των οχημάτων .

Ο σκοπός που εξυπηρετεί μια σήραγγα συνοψίζεται κυρίως στα ακόλουθα .

- Ø Τη σοβαρή βελτίωση της χάραξης τόσο οριζοντιογραφικά για τη σημαντική μείωση του μήκους του έργου όσο και υψομετρικά για τη σημαντική βελτίωση της μηκοτομής .
- Ø Την αποφυγή και παράκαμψη μεγάλων φυσικών εμποδίων, συνηθέστερα ορεινοί όγκοι και σπανιότερα υδάτινα εμπόδια .
- Ø Σε μεγάλα υδραυλικά έργα, όπου χρησιμοποιούνται αγωγοί, η κατασκευή κατά τμήμα ή τμήματα του κυρίου αγωγού ύδρευσης, μεγαλύτερου μήκους από τη σήραγγα, μπορεί να οδηγήσει σε λύσεις μεγάλου περιορισμού του ολικού του μήκους και συνεπώς στην οικονομικότερη κατασκευή του έργου .



Πάνω αριστερά : Η κατασκευή της γραμμής 2, του μετρό Αττικής .

Πάνω δεξιά : Η διάνοιξη των οδικών σηράγγων στην Κακιά Σκάλα Μεγάρων .

Κάτω αριστερά : Η σιδηροδρομική σήραγγα στην περιοχή της Κακιάς Σκάλας, παράλληλης χάραξης με εκείνης των οδικών σηράγγων .

1.3 Κατηγορίες Υπόγειων Έργων & Κριτήρια Επιλογής Της Διατομής Αυτών

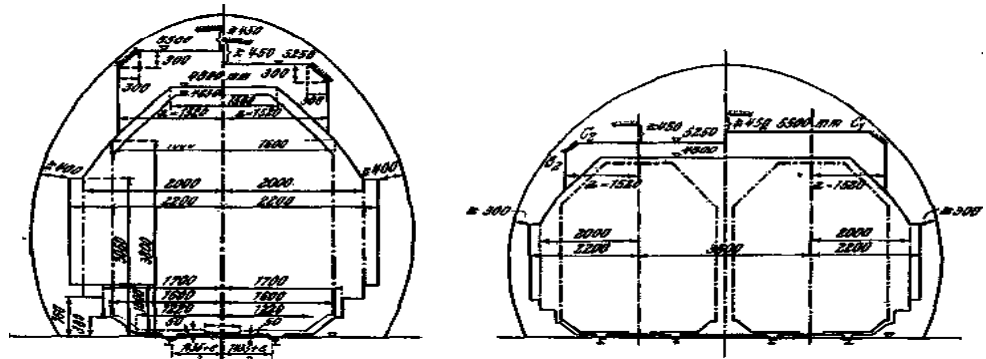
Η επιλογή της διατομής, στην περίπτωση κατασκευής οδικών σηράγγων αλλά και γενικότερα, εξαρτάται από τις ακόλουθες παραμέτρους :

- Ø Την κατατομή των οχημάτων που θα χρησιμοποιήσουν την εν λόγω σήραγγα .
- Ø Την σταθερότητα (συνεκτικότητα) του εδάφους πάνω στο οποίο θα θεμελιωθεί το υπόγειο έργο, την εξασκούμενη πίεση και την περιεκτικότητα σε νερό του ανωτέρω εδάφους .
- Ø Την εφαρμοζόμενη μέθοδο διάνοιξης .
- Ø Το υλικό και την στερεότητα των τοιχωμάτων της σήραγγας καθώς και από τις ενεργούσες εσωτερικές ωθήσεις του εδάφους .

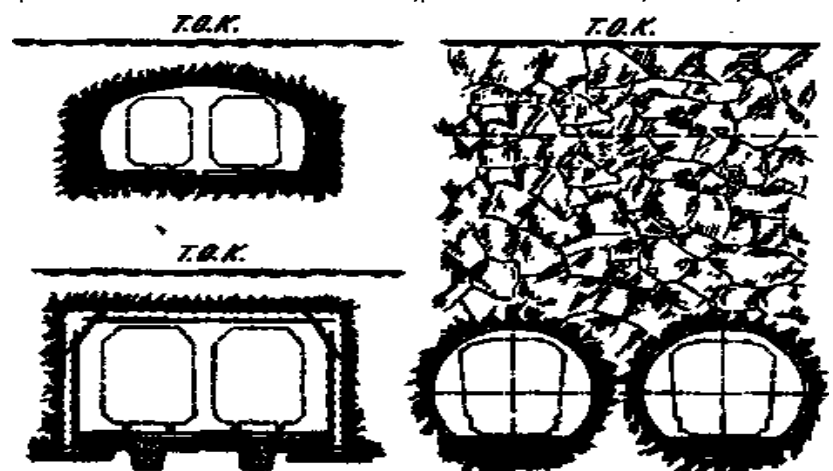
Στα ακόλουθα σχήματα δίδονται οι πλεονεκτικότερες και πιο συνηθισμένες διατομές σηράγγων που χρησιμοποιούνται έως σήμερα .

Σε σιδηροδρομική σήραγγα, η διατομή σε σχήμα πετάλου είναι η πλέον διαδεδομένη και μάλιστα η διατομή αυτή είναι όρθια όταν έχουμε μια γραμμή σιδηροτροχιών και πεπλατυσμένη, στην περίπτωση των δύο γραμμών σιδηροτροχιών, όπως φαίνεται και στα παρακάτω σχήματα .

Τυπικές διατομές για σήραγγες τρένων



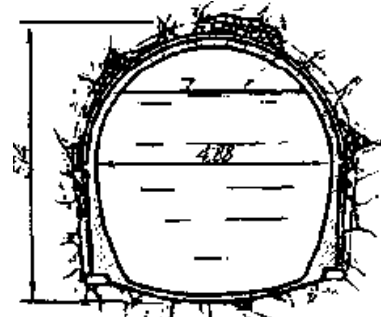
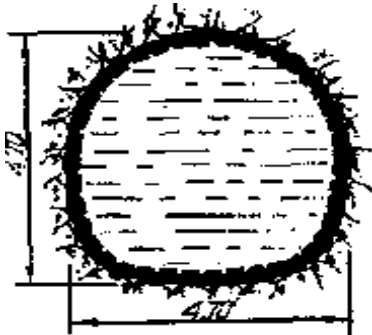
Στις κατασκευές του υπόγειου σιδηροδρόμου σε μικρό βάθος (σχήμα αριστερά) είναι συνήθεις οι διατομές του άνω και κάτω σχήματος, ενώ σε βαθύτερες



κατασκευές (σχήμα 2 δεξιά) κατασκευάζονται, αντιθέτως, σωλήνες με χωριστές κυκλικές

διατομές .

Στην περίπτωση κατασκευής γαλαριών - σιράγγων ροής νερού, με ελεύθερη επιφάνεια νερού (σχήμα άνω δεξιά) η διατομή τους είναι πέταλο, ενώ στην περίπτωση γαλαριών με νερό υπό πίεση οι διατομές είναι ως επί το πλείστον κυκλικές διατομές .

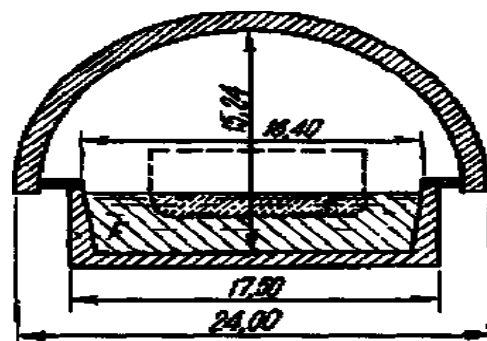


Τυπικές διατομές για σήραγγα με ροή υδάτων



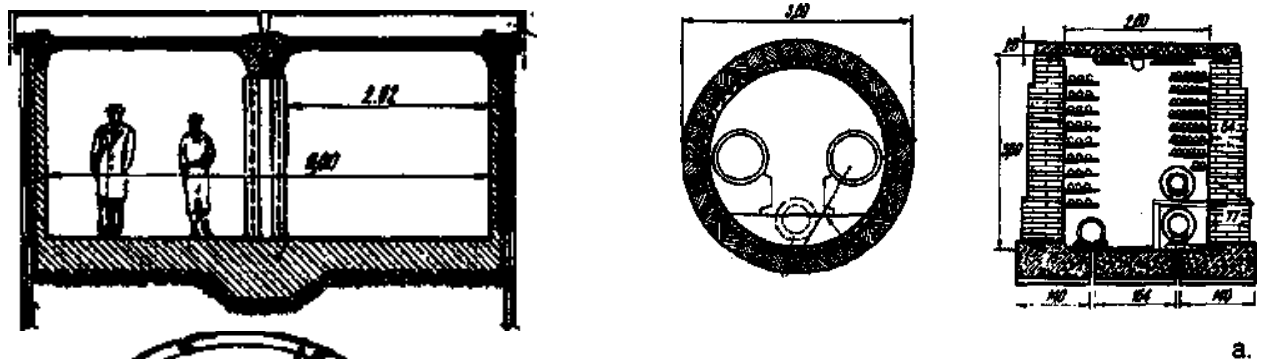
Το

χαρακτηριστικό προφίλ των ναυπλιακών σιράγγων είναι εκείνο της διατομής σκάφης .



Τυπική διατομή σήραγγα ναυπλιακής

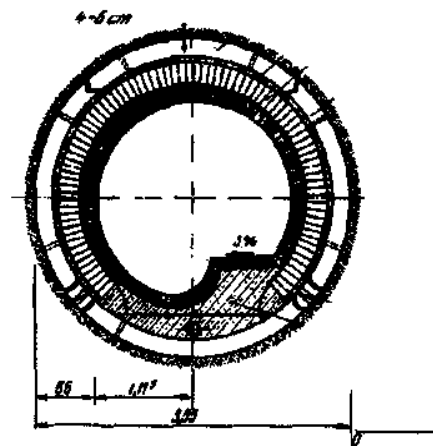
Οι σήραγγες για πεζούς και οι γαλαρίες αποχετεύσεων έχουν ορθογώνια ή κυκλική διατομή ανάλογα εάν κατασκευάζονται αμέσως κάτω από το κατάστρωμα του δρόμου ή τοποθετούνται βαθύτερα και ενδεχομένως, κάτω από την στάθμη ροής του υπόγειου νερού.



a.



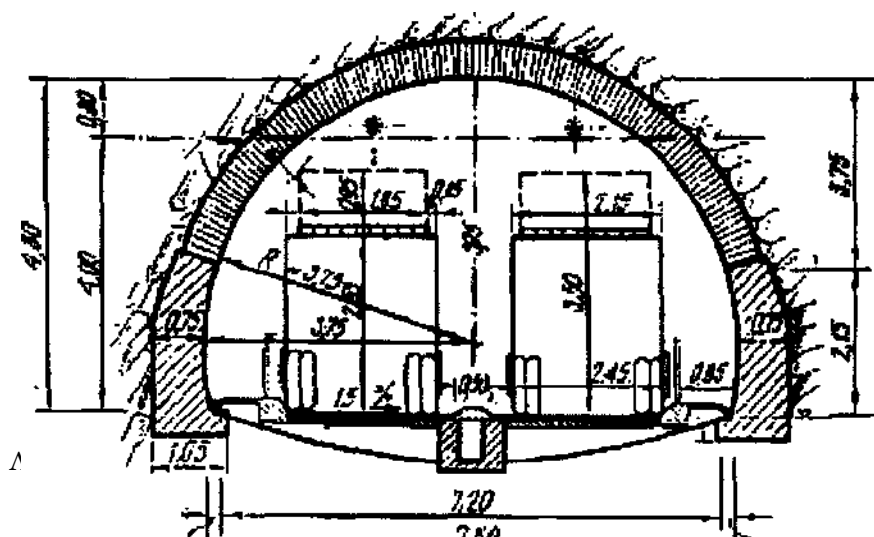
Τυπική διατομή σήραγγα για πεζούς

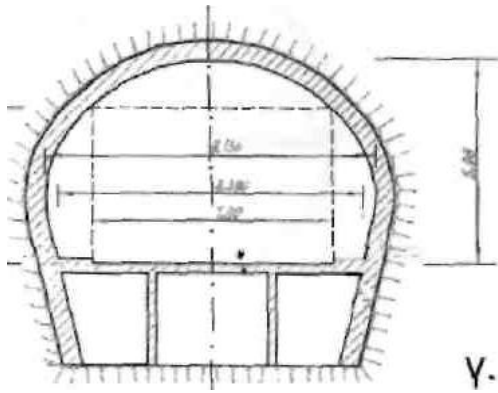


Τυπική διατομή διαφόρων αγωγών στην πόλη



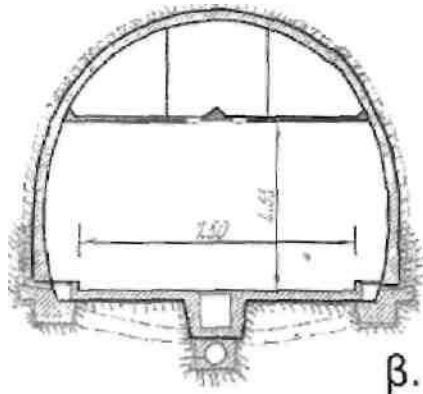
Εν αντιθέσει των υπολοίπων σηράγγων, οι οδικές σήραγγες ποικίλουν των σχημάτων των διατομών που δύναται να λάβουν . Οι σήραγγες αυτές είναι υπερυψωμένες διότι οι απαιτήσεις αερισμού σε αυτές είναι μεγαλύτερες έναντι των υπολοίπων ειδών σηράγγων .



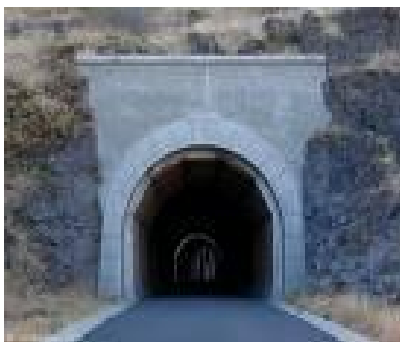
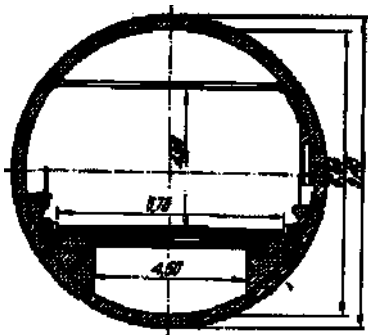
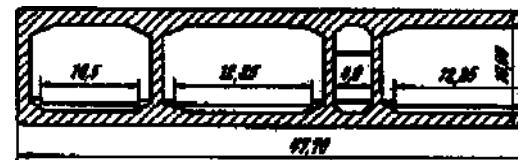
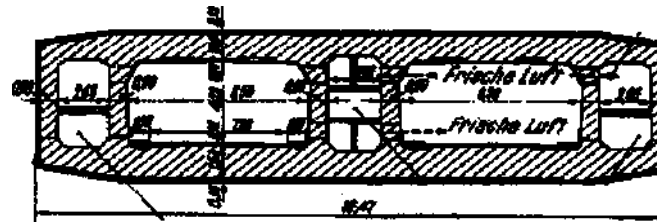


Πεταλοειδής διατομή σήραγγας, βάσει της οποίας κατασκευάζονται οι γερμανικοί αυτοκινητόδρομοι

Για τις οδικές σήραγγες που βρίσκονται κάτω από το νερό, προτιμάται η κυκλική διατομή ενώ η ορθογώνια ενδείκνυται για εκείνες που είναι βυθισμένες και κατασκευασμένες



β.



από
σιδηρομπετόν.



Διάφορες τυπικές διατομές οδικών έργων σηραγγοποιίας



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Μελέτη Χάραξης Του Άξονα Της Σήραγγας Παράγοντες Επιρροής

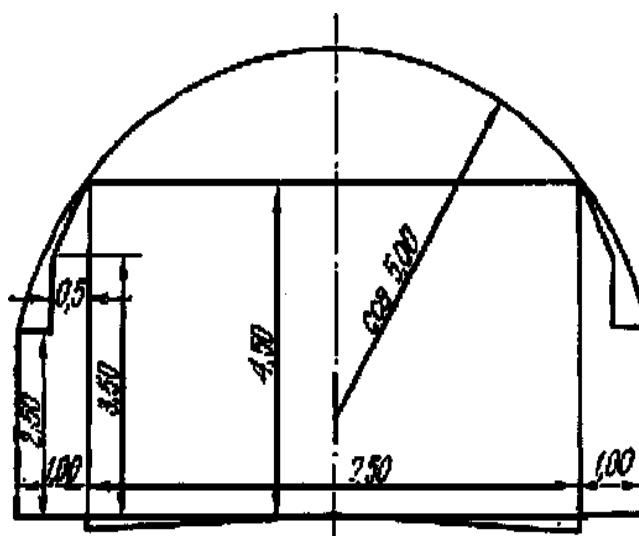
2.1. Η Επίδραση Του Ελεύθερου Χώρου Εντός Της Σήραγγας

Ο χώρος που θα είναι ελεύθερος για την κυκλοφορία μέσα στο σήραγγα πρέπει να είναι γνωστός από την έναρξη των εργασιών σχεδίασης .

Στην περίπτωση των **σιδηροδρομικών σηράγγων**, το εσωτερικό περίγραμμα της σήραγγας πρέπει να αφήνει ένα περιθώριο ελεύθερου χώρου τουλάχιστον **30 - 40** εκατοστά . Αυτό το περιθώριο είναι απαραίτητο για την αντιμετώπιση, αργότερα, ενδεχόμενων κατασκευαστικών κακοτεχνιών καθώς και διαφόρων πιθανών παραμορφώσεων της σήραγγας λόγω κλίσεων ή μετακινήσεων συσσωρευμένων μαζών εδάφους . Επίσης, το ανωτέρω περιθώριο είναι απαραίτητο για τον καλύτερο αερισμό της σήραγγας, για την απομάκρυνση των διαφόρων αερίων και προϊόντων καύσεως από τις ατμομηχανές και τους κινητήρες των μηχανημάτων που εργάζονται στο εσωτερικό της σήραγγας . Συνήθως, και για τους πιο πάνω λόγους η εσωτερική διατομή της σήραγγας υπερβαίνει, κατά **50 - 60** εκατοστά, το προφίλ που καταλαμβάνει ο όγκος του οχήματος .

Ακόμα, πρέπει να υπολογισθούν οι ανάγκες σε χώρο για εγκατάσταση αγωγών νερού, αγωγών υπό πίεση, αγωγών εξαερισμού, ηλεκτρικών καλωδίων, συστημάτων ασφάλειας κλπ., το οποίο έχει μεγαλύτερη σημασία για σήραγγα υπόγειων σιδηρόδρομων. Επίσης, πρέπει να λάβουμε υπόψη και την μελλοντική ή ενδεχόμενη, ηλεκτροκίνηση των τρένων, γιατί αυτή απαιτεί μεγαλύτερο ελεύθερο χώρο μέσα στο σήραγγα .

Στις **οδικές σήραγγες** απαιτείται ακόμα μεγαλύτερο περιθώριο ελεύθερου χώρου, λόγω καυσαερίων από τα οχήματα τα οποία είναι επικίνδυνα για τους επιβάτες αυτών . Επιπρόσθετα χρειάζεται καλύτερος εξαερισμός και επομένως περισσότερος χώρος . Επειδή στην κατασκευή των διαφόρων τύπων οχημάτων υπάρχουν τάσεις μεγέθυνσης των διαστάσεων τους, επιβάλλεται και ο υπολογισμός του ελεύθερου χώρου της σήραγγας να υπολογισθεί αντιστοίχως . Οι διαστάσεις του εσωτερικού περιγράμματος των σήραγγα στους γερμανικούς αυτοκινητοδρόμους δίδονται στο διπλανό σχήμα .



Κατανομή σήραγγα σε αυτοκινητόδρομο

Για τον υπολογισμό της διατομής των **ναυπλιακών σήραγγων** πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η σχέση της διαβρεχόμενης διατομής **F** και της βυθισμένης στο νερό διατομής **f** του πλοίου, όπως επίσης και το ύψος του νερού που μένει κάτω από το βυθισμένο τμήμα του πλοίου. Αυτό συμβαίνει γιατί οι αντιστάσεις έλξης του πλοίου αυξάνουν βαθμιαία και το πηλίκο **n = F/f** δεν φθάνει, τουλάχιστον, τις τιμές **2.5 – 3.0**. Η κατάσταση αυτή απαιτεί, κυρίως, μία μεγέθυνση του μέτρου του βάθους του νερού. Λόγω των ανακρίβειών στις απαιτούμενες διαστάσεις, κατά την κίνηση των πλοίων, δίδεται στα ναυπλιακά σήραγγα ένα πλάτος, που υπερβαίνει το περίγραμμα των πλοίων τουλάχιστον κατά **1.50** μέτρο.

Από άποψη καλύτερης χρήσης του ελεύθερου χώρου στα σήραγγα, η ορθογώνια διατομή είναι η ευνοϊκότερη ενώ η κυκλική η δυσμενέστερη. Για γαλαρίες μεταφοράς νερού ισχύει το ακριβώς αντίθετο.

Όσον αφορά στις **γαλαρίες μεταφοράς νερού**, η διατομή τους είναι συνάρτηση της μάζας του νερού που κινείται σε αυτές και φυσικά της ταχύτητας ροής του νερού. Στους αγωγούς ελεύθερης στάθμης, που έχουν συνήθως πεταλοειδή διατομή, θα πρέπει το περιθώριο μεταξύ της κορυφής της σήραγγας και της ελεύθερης επιφάνειας του νερού να είναι **0.50 – 1.00** μέτρο. Στους αγωγούς υπό πίεση και οι οποίοι έχουν κυκλική διατομή, το νερό καταλαμβάνει ολόκληρη την διατομή της γαλαρίας.

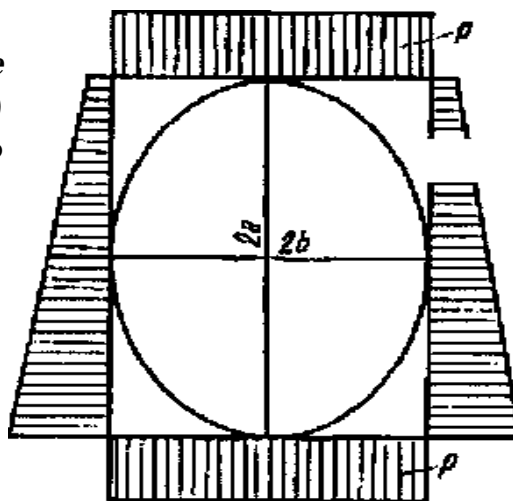
2.2. Η Επίδραση Της Φύσης Του Εδάφους Που Διασχίζει Η Σήραγγα

Η διατομή των σηράγγων εξαρτάται εκτός από το αναγκαίο περιθώριο του ελεύθερου χώρου, όπως αναφέρθηκε και ανωτέρω, και από την φύση του εδάφους. Το μέγεθος των εξωτερικών πιέσεων (π.χ. των πιέσεων του εδάφους), εξαρτάται από το είδος του πετρώματος και οι **ενασκούμενες** στο εσωτερικό της σήραγγας κάθετες και πλευρικές πιέσεις προέρχονται και αυτές από το πέτρωμα.

Όσο πιο χαλαρή και ελαφριά είναι η ορεινή περιοχή, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η ενασκούμενη πίεση και κυρίως η πλευρική. Όσο πιο πολύ, όμως, αυξάνει η πλευρική αυτή πίεση, τόσο περισσότερο τείνουμε να οδηγηθούμε στην κατασκευή κυκλικών διατομών. Όταν το πέτρωμα είναι στερεό και δεν υπόκειται, σε αποσάθρωση, μπορεί το θολωτό τμήμα της διατομής της σήραγγας να μείνει χωρίς επένδυση. Η απόφαση επιλογής της ιδανικής διατομής στηρίζεται στους νόμους της Στατικής και στους νόμους των πιέσεων του εδάφους.

Λαμβάνοντας υπόψη την **σχέση Rankine** (νόμος κάθετων πιέσεων προς πλευρικές) δημιουργείται μία έλλειψη, της οποίας ο κύριος και ο δευτερεύων άξονας υπολογίζονται ως ακολούθως.

$$\frac{2^*a}{2^*b} = \frac{1}{\text{tg}^2(45 - \frac{f}{2})}$$



Για **αμμώδη εδάφη** με γωνία εσωτερικής τριβής $\varphi=30$, για παράδειγμα προκύπτει μία σχέση όπως η ακόλουθη .

$$\frac{2 \cdot a}{2 \cdot b} = \frac{1}{0.577} = 1.6$$

Από την τελευταία σχέση, συνάγουμε ότι έχουμε τον σχηματισμό μιας διατομής της οποίας το ύψος είναι **1.6** φορές μεγαλύτερο από το πλάτος της, γεγονός το οποίο, συνήθως, ισχύει στη κατασκευή σήραγγα σιδηροδρόμων .

Αντίθετα, σε **διαβρεχόμενα αργιλώδη εδάφη**, όπου η γωνία εσωτερικής τριβής είναι $\varphi=0$ και $\frac{2 \cdot a}{2 \cdot b} = 1$ η έλλειψη που προαναφέραμε γίνεται κύκλος .

Στα **πετρώματα**, γενικά, μπορεί να ληφθεί η σχέση αυτή με την έννοια του παρακάτω πηλίκου .

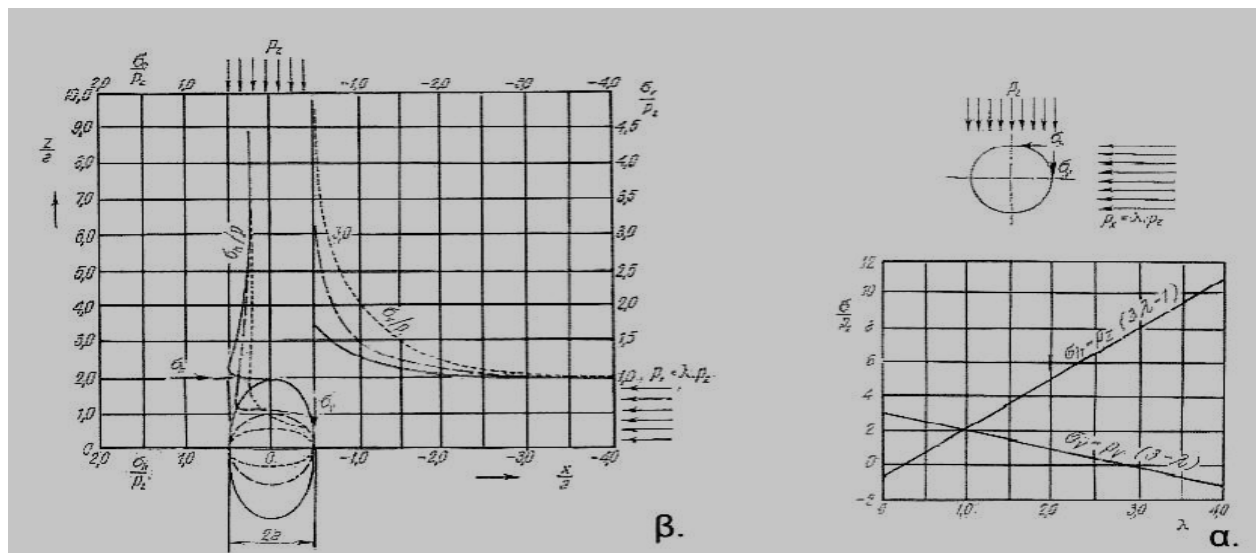
$$\frac{m}{1-m} \cdot \left(\frac{1}{m-1} \right)$$

όπου, μ = ο λόγος **Poisson** του πετρώματος και $m = 1 / \mu$.

Ο **Fluner** αποδεικνύει πως, ναι μεν, ένα προφίλ σχήματος έλλειψης έχει πιο πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με το κυκλικό σχήμα διατομής, γιατί μειώνει τις τάσεις έλξης που αναπτύσσονται στην κορυφή της σήραγγας αλλά ευνοεί και την ανάπτυξη μεγάλων τάσεων πίεσης στην κορυφή . Επιλέγει, λοιπόν, εκείνη την ενδιάμεση μορφή στην οποία, οι τάσεις που εμφανίζονται στην κορυφή έχουν τιμή μηδέν . Η μορφή αυτή είναι μια έλλειψη με κατακόρυφο κύριο άξονα και με σχέση στον δευτερεύοντα άξονα τον λόγο

$$\frac{b}{a} \cdot \left(\frac{2}{m-2} \right)$$

Τελευταία, οι **Terzaghi και Richart** ασχολήθηκαν με τις επιδράσεις της μορφής της διατομής επάνω στις τάσεις . Διαπίστωσαν πως η πίεση στην οροφή μεγαλώνει από **0.25 p_z** έως **0.50 p_z** ενώ η σχέση των αξόνων της έλλειψης πέφτει από 1/2 σε **2**, όπως προκύπτει από το παρακάτω σχήμα .



Πιέσεις οροφής

Πλευρικές πιέσεις

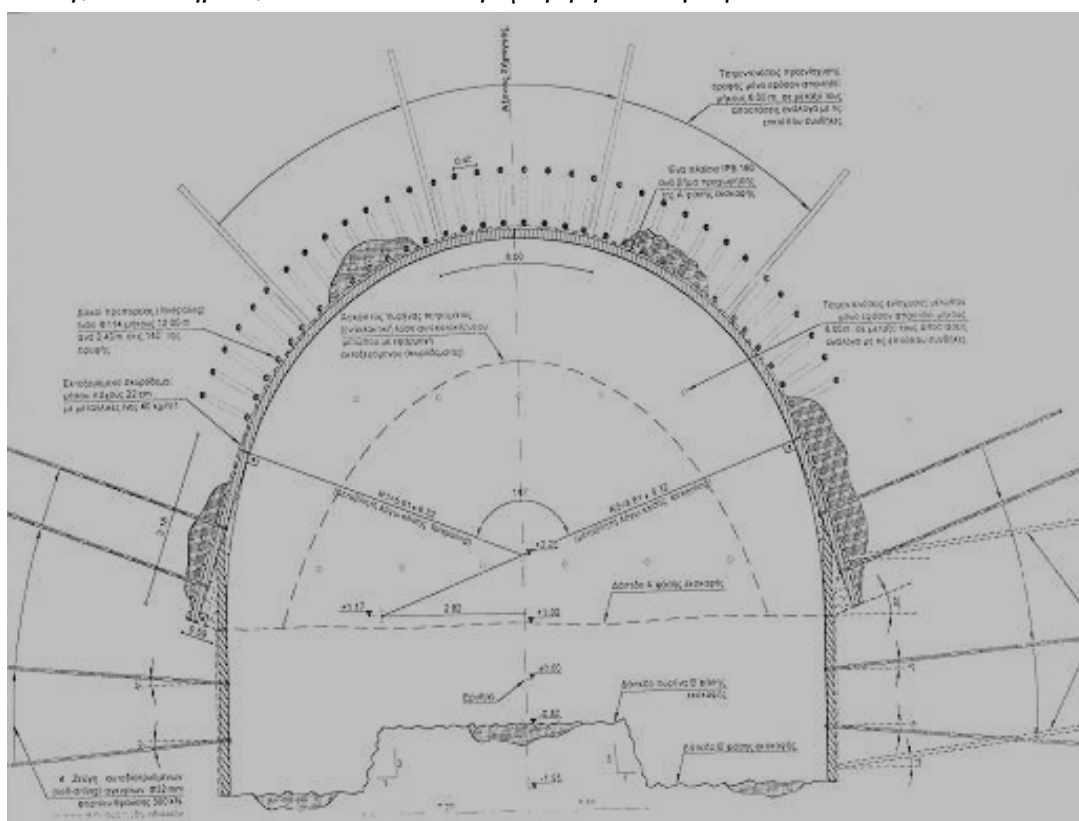
Οι τάσεις που εμφανίζονται, στην οροφή της σήραγγας, αυξάνονται από $1,75 p_2$ σε $4,75 p_2$, όταν η σχέση των αξόνων της έλλειψης μεταβληθεί από $\frac{1}{2}$ σε 2 . Στην περίπτωση αυτή ο αριθμός των πλευρικών πιέσεων είναι $\lambda = 0,25$, όπου η επίδραση αυτή εμφανίζεται στις τάσεις οροφής σ_h και σ_v , όπως φαίνονται στο ανώτερο σχήμα, αριστερά. Από το τελευταίο σχήμα φαίνεται ότι οι τάσεις της οροφής αυξάνουν πολύ, όσο αυξάνονται οι πλευρικές πιέσεις (αυξανόμενου του λ) ενώ οι κανονικές τάσεις στην οροφή μειώνονται. Προκύπτει, δηλαδή, το συμπέρασμα πως η επιλογή της μορφής της διατομής καθορίζεται πάντοτε από την σχέση των κάθετων προς τις οριζόντιες ωθήσεις. Ανάλογα με το ποια ώθηση, η κάθετη ή η οριζόντια, είναι η μεγαλύτερη θεωρείται αντίστοιχα και η κάθετη ή η οριζόντια μορφή έλλειψης η ευνοϊκότερη.

Βασικό ρόλο στο πρόβλημα αυτό παίζει η δυνατότητα ελεύθερης παραμόρφωσης. Όπου παρεμποδίζεται η παραμόρφωση, την μεγαλύτερη επίδραση εξασκούν οι κανονικές τάσεις ενώ όταν η παραμόρφωση είναι ελεύθερη και δεν παρεμποδίζεται, οι τάσεις κάμψεως είναι πιο σημαντικές. Στην πράξη, η έλλειψη αντικαθίσταται από μια καμπύλη σχήματος καλαθιού. Μονόπλευρες πλευρικές πιέσεις καθιστούν αναγκαία την κατασκευή ασύμμετρων διατομών.

Εάν έχουμε την δυνατότητα να καθορίσουμε το μέγεθος αλλά κυρίως την διεύθυνση της πίεσης, μπορούμε να κατασκευάσουμε την διατομή της σήραγγας, έτσι ώστε ο άξονας της διατομής του θολωτού τμήματος να βρίσκεται παράλληλα προς την διεύθυνση της πίεσης. Η διατομή, στις περιπτώσεις αυτές, είναι τελείως κλειστή και κατά προτίμηση κυκλική.

Μία ασύμμετρη κατασκευή διατομής κοστίζει πάντα περισσότερο γιατί η διατομή, εκτός από τον αναγκαίο, περιλαμβάνει και πρόσθετο αχρησιμοποίητο χώρο και εκτός του ότι χρησιμοποιείται μεγαλύτερη τοιχοποιία.

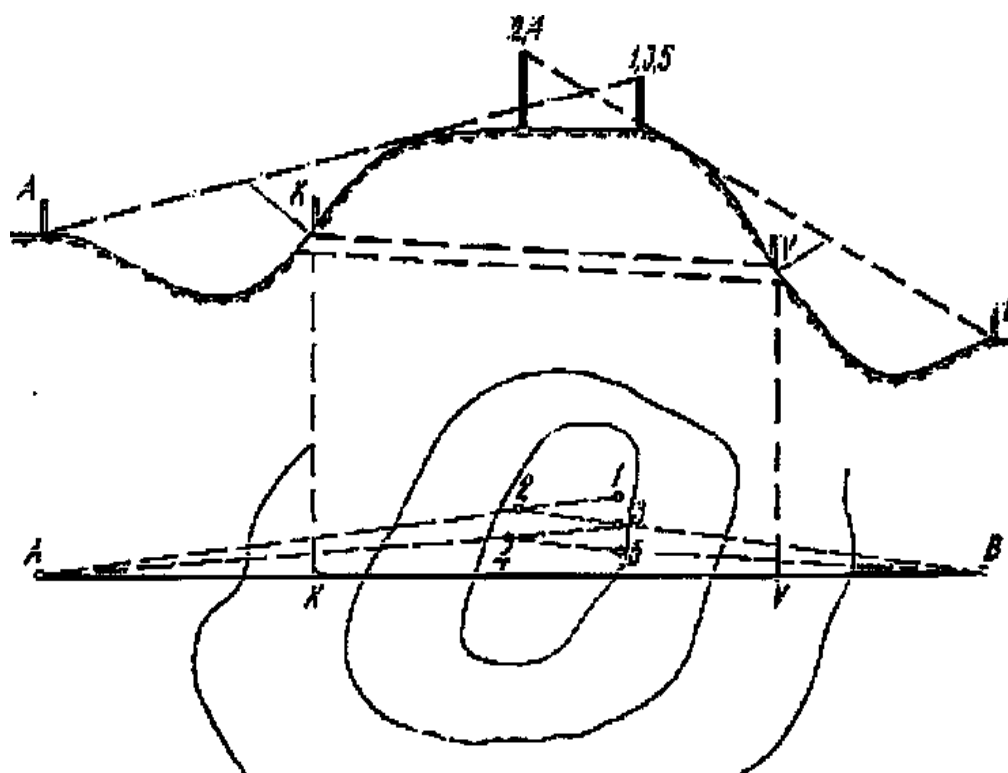
Η φύση του πετρώματος ή του εδάφους καθορίζει, συγχρόνως, τον εφαρμοστέο τρόπο κατασκευής που επηρεάζει, τελικά, και την μορφή του προφίλ.



2.3. Οριζόντια Χάραξη Σήραγγας

2.3.1. Χάραξη σήραγγας, μικρού μήκους

Η χάραξη μικρών σήραγγων γίνεται, όπως η χάραξη ευθείας μεταξύ δύο σημείων εκ των οποίων το ένα δεν είναι ορατό από το άλλο. Μια παράσταση του προβλήματος αυτού δίδεται στο ακόλουθο σχήμα.

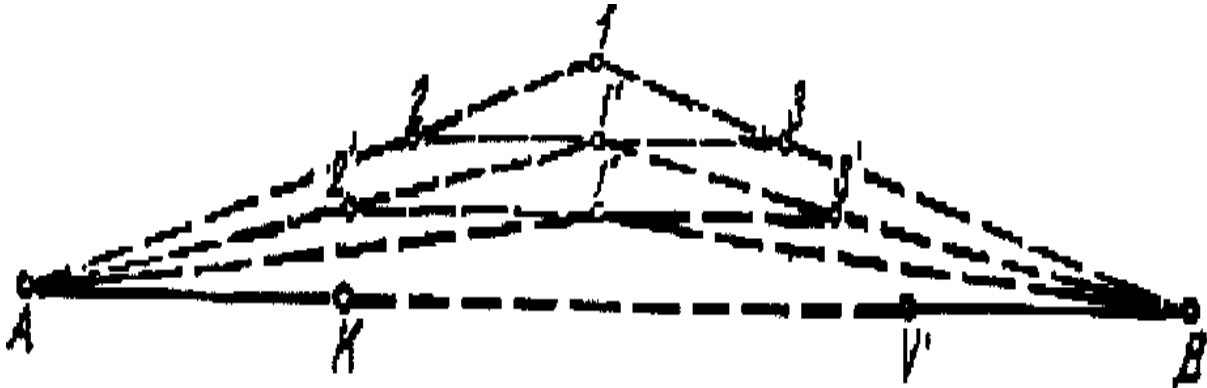


Χάραξη δια διαδοχικών προσεγγίσεων

Έστω σαν K και V το αρχικό και τελικό σημείο, του υπό χάραξη, άξονα του σήραγγα. Ο άξονας μπορεί να μεταφερθεί επί της ευθείας AB . Καταρχήν, χαράσσεται η γραμμή $A21$. Ακολούθως, από το B σημειώνεται το σημείο 3 επί της ευθείας $B2$ και περαιτέρω το σημείο 4 επί της ευθείας $A3$. Η ευθεία AB χαράσσεται, όταν οι γραμμές επί του λόφου, τόσο από το σημείο A , όσο και από το B βρίσκονται πάνω σε ευθεία.

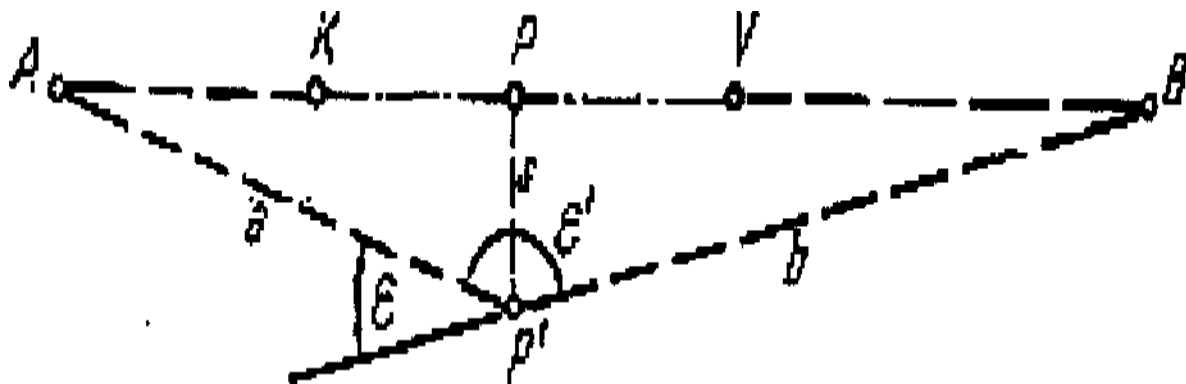
Εάν οι γραμμές δεν μπορούν να τεθούν έτσι ώστε να είναι ορατές τόσο από το A , όσο και από το B όπως στο ανωτέρω σχήμα, τότε χαράσσεται μια τρίτη γραμμή έτσι ώστε να είναι ορατή και από τα δύο σημεία.

Αρχικά, χαράσσεται το σημείο 1 , όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα, έτσι ώστε να είναι ορατό από τα A και B και σημειώνονται τα 2 και 3 επί των ευθειών $A1$ και $B1$ αντίστοιχα. Η διαδικασία συνεχίζεται με τη χάραξη του $1'$ επί του τμήματος 23 , του $1''$ επί του $2'3'$ κλπ. Ακολούθως, σημειώνονται το K επί της ευθείας $A1$ και το V επί της $B1$. Τα σημεία A, B, K και V καθορίζουν τον άξονα του σήραγγα κατά την διάρκεια των εργασιών κατασκευής.



Μια άλλη δυνατότητα χαράξεως προσφέρει η μέτρηση απόστασης και γωνίας . Δίνονται τα σημεία A και B της υπό χάραξης ευθείας, όπως στο ακόλουθο σχήμα . Επί της ευθείας αυτής μπορούν να καθορισθούν πάλι το αρχικό και τελικό σημείο K και V του σήραγγα . Για την μέτρηση των αποστάσεων a και b του σχήματος όπως και τής γωνίας ϵ στο P' , λαμβάνουμε την απόσταση S από τη εξής σχέση .

$$S = \frac{a * b}{a + b} * e$$



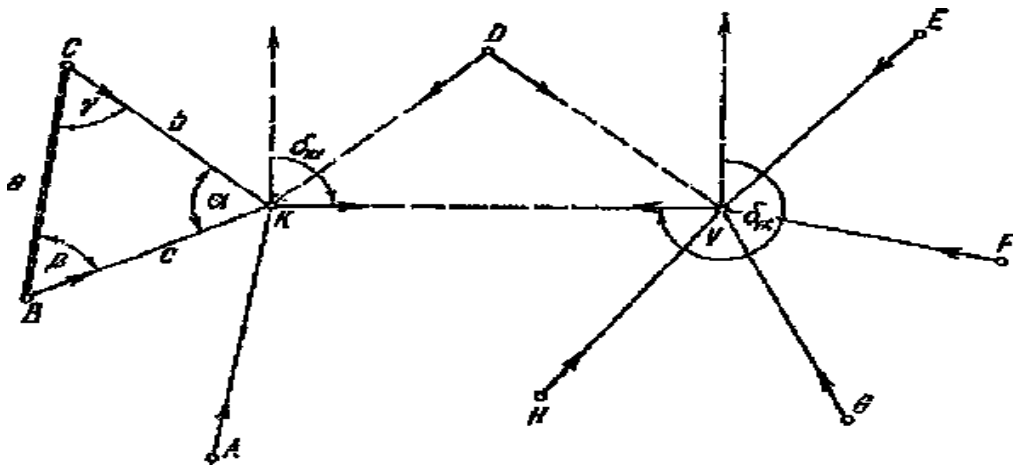
Πρόκειται περί τύπου προσεγγίσεως, που πληρείται όταν $\{a + b\} \sim (AB)$ και $\sin \epsilon \sim \epsilon$. Με την επανάληψη της διαδικασίας αυτής έχει κανείς την δυνατότητα να χαράζει επακριβώς το P . Η μέθοδος αυτή είναι πιο πολύπλοκη των δύο άλλων που αναφέρθηκαν .

2.3.2. Χάραξη σήραγγας, μεγάλου μήκους, με αναφορά στο τριγωνομετρικό δίκτυο της περιοχής

Σήραγγα μήκους πολλών χιλιομέτρων μπορούν να χαραχθούν με τη βοήθεια των μεθόδων της προηγούμενης παραγράφου αλλά χρειάζεται άμεσα ένας θεοδόλιχος . Τη βάση της χάραξης εδώ αποτελεί ένα δίκτυο σταθερών σημείων της περιοχής αλλά η χάραξη μπορεί να γίνει και βάση μιας αυτοτελούς πολυγωνικής γραμμής .

Έστω K και V δύο γνωστά σημεία της περιοχής, τα οποία βρίσκονται στον υπό χάραξη άξονα του σήραγγα, όπως στο παρακάτω σχήμα . Το πρόβλημα είναι να χαράξουμε την ευθεία VK από το V και την KV από το σημείο K .

Καταρχήν, λαμβάνονται οι συντεταγμένες των σημείων V και K σε σχέση με το εθνικό σύστημα συντεταγμένων από τα δεδομένα σημεία A, B, C, D ή E, F, G και H μέσω όδευσης . Οι γωνίες μετρούνται σε δύο περιόδους .



Για την εύρεση των συντεταγμένων από τα γνωστά σημεία κατά την όδευση λαμβάνονται υπόψη δύο μέθοδοι .

α) Η μέθοδος με τις προσανατολισμένες κατευθύνσεις

Κατά την όδευση με τη μέθοδο αυτή, υπολογίζονται οι γωνίες μεταξύ των κατευθύνσεων από τα γνωστά σημεία A, B, C, D ή E, F, G και H προς τα σημεία K ή V ως ακολούθως .

Τοποθετούμε το όργανο στο σημείο A και καθορίζουμε την κατεύθυνση μέσω της παρατηρήσεως τουλάχιστον δύο γνωστών σημείων (S, Q) και σημείου K . Εάν, d_{AS} και d_{AQ} είναι οι γωνίες μεταξύ των κατευθύνσεων προς το γνωστό σημείο, τότε προσδιορίζονται υπολογιστικά από τις συντεταγμένες των σημείων A και S ή Q από τις εξής σχέσεις .

$$d_{AS} = \arctan \frac{Y_S - Y_A}{X_S - X_A}$$

$$d_{AQ} = \arctan \frac{Y_Q - Y_A}{X_Q - X_A}$$

Εάν, l_{AS} , l_{AQ} , l_K είναι οι τιμές κατευθύνσεως που αντιστοιχούν στις κατευθύνσεις στα σημεία S , Q και K , τότε οι γωνίες προσανατολισμού z_{AS} και z_{AQ} υπολογίζονται ως εξής .

$$\begin{aligned}d_{AS} - l_{AS} &= z_{AS} \\d_{AQ} - l_{AQ} &= z_{AQ}\end{aligned}$$

Η δε μέση γωνία προσανατολισμού δίδεται ως ακολούθως .
$$Z_A = \frac{Z_{AS} + Z_{AQ}}{2}$$

Η προσανατολισμένη κατεύθυνση στο σημείο K υπολογίζεται βάσει της εξής σχέσης .

$$d_{AK} = l_{AK} + Z_A$$

Κατά τον ίδιο τρόπο υπολογίζονται και οι τιμές προσανατολισμού των κατευθύνσεων στα σημεία K ή V από άλλα σταθερά σημεία . Όσο πιο πολλά αποτελέσματα έχουμε, τόσο οι συντεταγμένες των ζητούμενων σημείων προσδιορίζονται ακριβέστερα .

β) Η μέτρηση των εσωτερικών γωνιών

Η όδευση με μέτρηση των εσωτερικών γωνιών χρησιμοποιείται εκεί όπου δεν απαιτείται μεγάλη ακρίβεια . Στις περιπτώσεις αυτές, περιοριζόμαστε στην όδευση δύο σημείων και στη μέτρηση των γωνιών καθώς και στα δύο γνωστά σταθερά σημεία, όπου μαζί με το νέο σημείο καθορίζουν ένα τρίγωνο, όπως φαίνεται στο προηγούμενο και οι οποίες είναι οι γωνίες β και γ στα B και C . Επειδή, η απόσταση (BC) λαμβάνεται υπολογιστικά από τις συντεταγμένες των σημείων, είναι και οι δύο άλλες πλευρές του τριγώνου BCK γνωστές, διότι ισχύει .

$$\begin{aligned}b &= a * \frac{\sin B}{\sin a} \\c &= a * \frac{\sin \gamma}{\sin a}\end{aligned}$$

Υπολογιστικά μπορούν να ληφθούν οι γωνίες κατευθύνσεως $\delta_{BK} = \delta_{BC} + \beta$ και $\delta_{CK} = \delta_{CB} - \gamma$ των πλευρών BK και CK , όπου $d = \arctan \frac{Y_c - Y_B}{X_c - X_B}$ και $\delta_{CB} = \delta_{BC} \pm 180^\circ$

Το σημείο K έχει τις συντεταγμένες
$$\begin{aligned}Y_K &= Y_B + (BK) * \sin d_{BK} \\X_K &= X_B + (BK) * \cos d_{BK}\end{aligned}$$

Από τις συντεταγμένες των σημείων υπολογίζονται οι γωνίες κατευθύνσεως της KV .

$$\begin{aligned}KV = d_{KV} &= \arctan \frac{Y_V - Y_K}{X_V - X_K} \\VK = d_{VK} &= d_{KV} + 180^\circ\end{aligned}$$

Ακολουθώντας από το K , χαράζουμε με βάση την κατεύθυνση προς τα γνωστά σημεία, την γωνία κατευθύνσεως δ_{Kv} και από το σημείο V την γωνία κατευθύνσεως δ_{vK} ως εξής .

Από τις κατευθύνσεις του σημείου K προς τα σημεία A, B, C και D σχηματίζεται η μέση γωνία προσανατολισμού . Εάν, l_A, l_B, l_C και l_D είναι οι μετρηθήσες τιμές κατευθύνσεως, τότε έχουμε την γωνία προσανατολισμού.

$$d_{KA} - l_{KA} = z_A$$

$$d_{KB} - l_{KB} = z_B$$

$$d_{KC} - l_{KC} = z_C$$

$$d_{KD} - l_{KD} = z_D$$

Έτσι η μέση γωνία προσανατολισμού στο K δίνεται ως εξής .

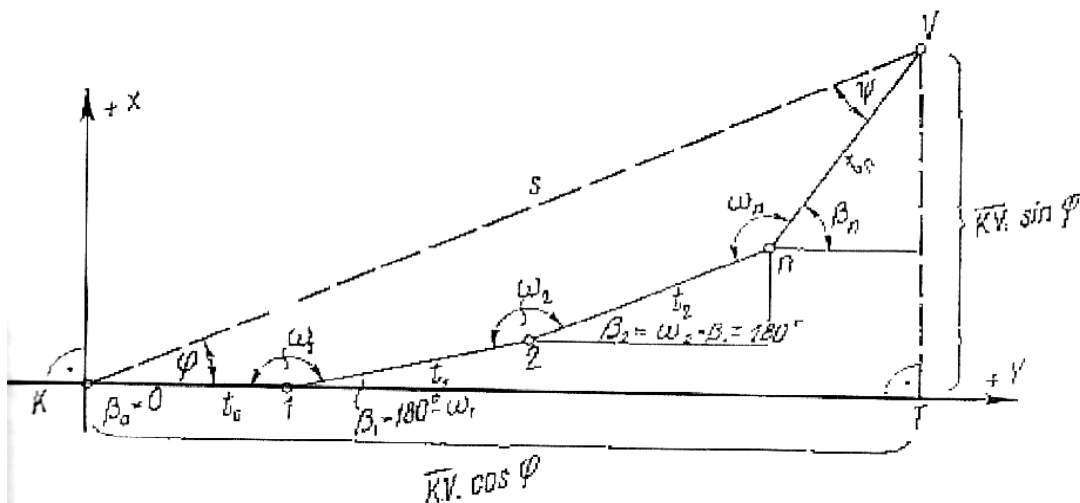
$$Z_K = \frac{Z_A + Z_B + Z_C + Z_D}{4}$$

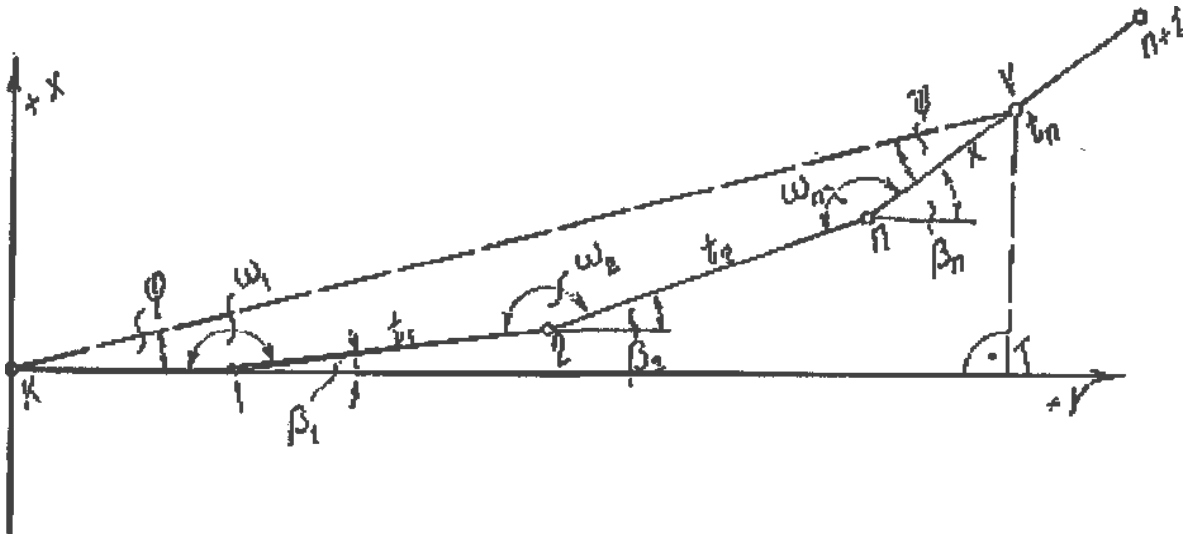
Έτσι, ο τύπος $l_{Kv} = \delta_{Kv} - z_K$ είναι η τιμή κατεύθυνσης της χάραξης . Ομοίως, βρίσκουμε στο σχηματισμό της μέσης γωνίας προσανατολισμού z_v προς την γωνία κατευθύνσεως δ_{vK} στο V , την τιμή l_{vK} από την σχέση $l_{vK} = \delta_{vK} - z_v$.

2.3.3. Χάραξη σήραγγας, μεγάλου μήκους, με αναφορά ενός ίδιου δικτύου σταθερών σημείων

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται, όταν η ακρίβεια της μεθόδου, που στηρίζεται στο εθνικό δίκτυο των σημείων δεν επαρκεί . Στις πιο απλές περιπτώσεις, ενδείκνυται η εφαρμογή της μεθόδου της αυτοτελούς πολυγωνικής γραμμής, στην οποία υφίστανται δύο δυνατότητες .

Η πρώτη, ξεκινά από δεδομένο αρχικό σημείο K και τελικό σημείο V του σήραγγα και προσδιορίζει τις, για την χάραξη, απαραίτητες γωνίες φ και ψ , όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα . Σε αυτήν την περίπτωση, είναι γνωστά από μετρήσεις τόσο οι πλευρές του πολυγώνου t_0, t_1, \dots, t_n όσο και οι γωνίες αυτού $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$.





Από το ανωτέρω σχήμα προκύπτει η ακόλουθη σχέση .

$$\frac{\overline{KV} \sin j}{\overline{KV} \cos j} = \tan j = \frac{\overline{VT}}{\overline{VT}} = \frac{[t_i \cdot \sin b_i]_{i=0}^{i=n}}{[t_i \cdot \cos b_i]_{i=0}^{i=n}}$$

όπου, $\beta_0 = 0$, $\beta_1 = 180^\circ - \omega_1$, $\beta_2 = \omega_2 - \beta_1 \pm 180^\circ$, $\beta_n = \omega_n - \beta_{n-1} \pm 180^\circ$

$$Y = n \cdot 180^\circ - f - [w_i]_{i=1}^{i=n}$$

όπου, n ο αριθμός των σημείων του πολυγώνου .

Η δεύτερη προϋποθέτει ότι είναι δεδομένα το αρχικό σημείο K και η γωνία φ και υπολογίζει τη θέση του σημείου V όπως και τη γωνία χάραξης του σήραγγα ψ , όπως παρατηρείται στο ακόλουθο σχήμα . Και σε αυτήν την περίπτωση, μετρούνται οι πλευρές και οι γωνίες του πολυγώνου . Από το ανωτέρω σχήμα προκύπτει αντίστοιχα η εξής σχέση καθώς και η γωνία ψ .

$$\tan j = \frac{[t_i \cdot \sin b_i]_{i=0}^{i=n-1} + x \cdot \sin b_n}{[t_i \cdot \cos b_i]_{i=0}^{i=n-1} + x \cdot \cos b_n}$$

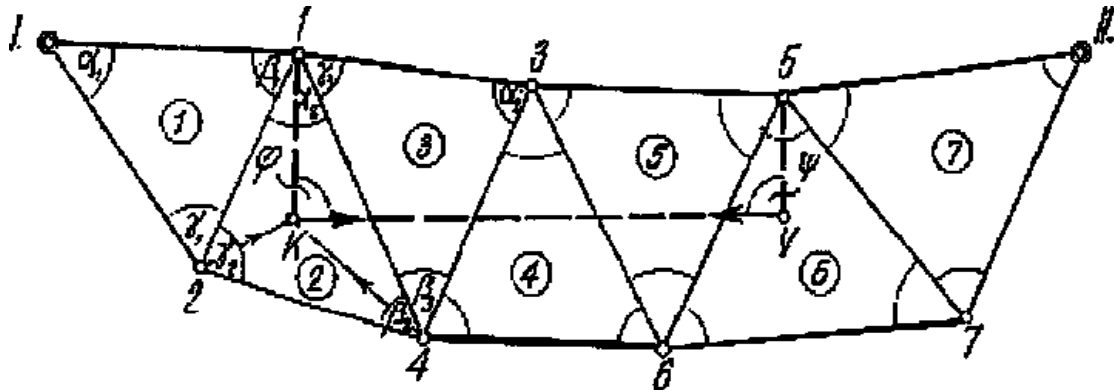
$$x = \frac{[(t_i \cdot \sin b_i)]_{i=0}^{i=n-1} - \tan j [(t_i \cdot \cos b_i)]_{i=0}^{i=n-1}}{\tan j \cdot (\cos b_n) - (\sin b_n)}$$

$$y = (n - 1)180 - j - [w_i]_{i=1}^{i=n-1}$$

Για τη χάραξη μεγάλου μήκους σήραγγας, **8 - 10 Km**, πρέπει να φτιάξουμε ένα αυτοτελές δίκτυο τριγώνων, όταν η ακρίβεια του εθνικού δικτύου δεν επαρκεί . Αλλά και η αυτοτέλεια του δικτύου, που αποτελεί την βάση της χάραξης, μπορεί να είναι δύο ειδών .

Στην πρώτη περίπτωση, υπάρχουν τουλάχιστον δύο σημεία του δικτύου τριγώνων όπως επίσης και σημεία του εθνικού δικτύου . Με τον τρόπο αυτό, δεν είναι αναγκαία η μέτρηση ειδικής βάσεως, αντίθετα όμως πρέπει να μετρηθούν όλες οι γωνίες των τριγώνων .

Για την μέτρηση χρησιμοποιούμε θεοδόλιχο με δυνατότητα μέτρησης 1" σε τουλάχιστον 4 περιόδους . Η καλύτερη διαδικασία είναι εάν θέσουμε την αλυσίδα των τριγώνων κατά μήκος του άξονα της σήραγγας . Αυτή η αλυσίδα μπορεί να έχει την μορφή του ακόλουθου σχήματος .



Τα σημεία I και II είναι σημεία ομοίως του εθνικού δικτύου ενώ τα 1,2,3,4,5,6,7 είναι νέα σημεία της αλυσίδας . Οι συντεταγμένες των νέων σημείων προσδιορίζονται σε δύο στάδια . Καταρχήν, παραδεχόμαστε πως π.χ. το μήκος της πλευράς 1 εκφράζεται με ένα ακέραιο αριθμό, έπειτα βρίσκουμε με βάση των μετρήσεων των γωνιών, το μήκος όλων των πλευρών και τέλος τις συντεταγμένες όλων των σημείων του δικτύου .

Εάν θέσουμε για τις συντεταγμένες του σημείου I Y_I και X_I έχουμε τις προσωρινές συντεταγμένες Y_{II} και X_{II} του σημείου II ως και εκείνες των άλλων σημείων . Μετά υπολογίζονται οι παράγοντες αναλογίας μεταξύ δικτύου με προσωρινά μήκη πλευρών και του πραγματικού δικτύου . Προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις .

$$c_y = \frac{Y_{II} - Y_I}{Y_{II}'}$$

$$c_x = \frac{X_{II} - X_I}{X_{II}'}$$

Σε δεύτερη φάση υπολογίζουμε τις συντεταγμένες των σημείων από τις εξής σχέσεις .

$$y_1 = y_1 + c_y \cdot y_1'$$

$$x_1 = x_1 + c_x \cdot x_1'$$

$$y_2 = y_2 + c_y \cdot y_2'$$

$$x_2 = x_2 + c_x \cdot x_2'$$

$$y_n = y_1 + c_y \cdot y_n'$$

$$x_n = x_n + c_x \cdot x_n'$$

Επειδή, έτσι γίνονται γνωστές οι συντεταγμένες όλων των σημείων του αυτοτελούς δικτύου, μπορεί να γίνει η χάραξη του σήραγγα, ακριβώς όπως και στην περίπτωση του εθνικού δικτύου.

Στη δεύτερη περίπτωση καθότι μετριέται επίσης μια γραμμή βάσεως, προσδιορίζουμε τις συντεταγμένες τουλάχιστον ενός σημείου και τη διεύθυνση τουλάχιστον μιας πλευράς τριγώνου στο εθνικό δίκτυο . Μια πλευρά του αυτοτελούς δικτύου προκύπτει κατά κανόνα από τη μετρηθείσα βασική γραμμή με τη βοήθεια του δικτύου βάσεως .

Έπειτα, υπολογίζεται το μήκος όλων των πλευρών, βάση των μετρηθείσων γωνιών . Ακολούθως, βρίσκεται η γωνία κατευθύνσεως όλων των πλευρών από την πλευρά με την μετρηθείσα γωνία κατευθύνσεως . Τελικά, προσδιορίζονται οι συντεταγμένες των σημείων υπολογιστικά, όπου λαμβάνονται υπόψη οι συντεταγμένες του σημείου που αναφέρονται στο εθνικό δίκτυο. Η χάραξη γίνεται μετά κατά τα γνωστά .

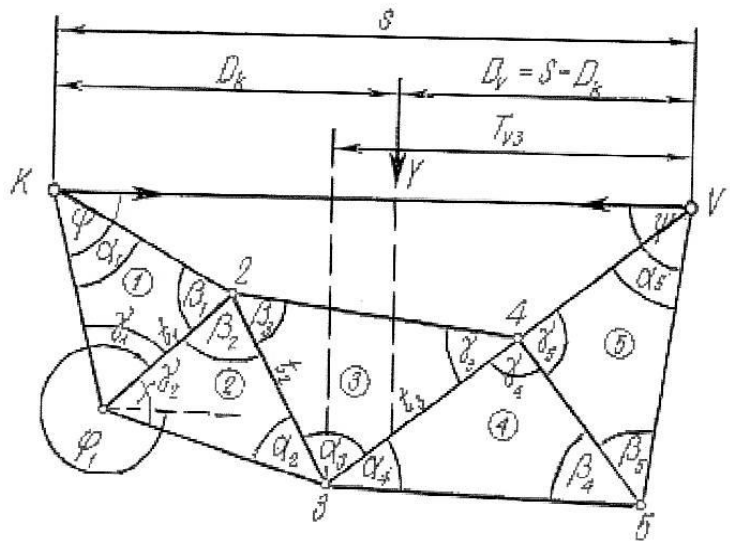
Εάν βάση της χάραξης με ένα δίκτυο τριγώνων, τότε το μέσο σφάλμα προκύπτει από το παρακάτω σχήμα ως ακολούθως .

$$\Delta_Y = [e_g (D-T)]_{i=1}^{i=n} + [e_t * \sin f]_{i=1}^{i=n}$$

όπου, e_g και e_t το σφάλμα των γωνιών φ και t εκείνο των πλευρικών μηκών και

n ο αριθμός των πλευρών .

Το πρόσημο του πρώτου μέλους στην τελευταία σχέση είναι θετικό, όταν φ_i είναι η γωνία στο σημείο 1 και είναι μεγαλύτερη των 180° και τέλος γίνεται αρνητικό, όταν η γωνία φ_i παριστά το συμπλήρωμα της στις 360° .

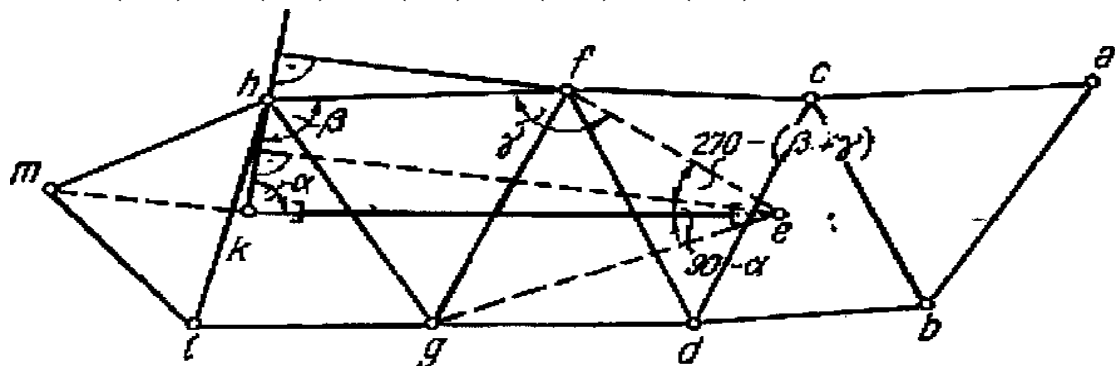


Η αλυσίδα, σύμφωνα με το τελευταίο σχήμα, υπολογίζεται ακριβώς όπως σε μια αυτοτελή πολυγωνική γραμμή, επειδή τα σημεία K, 1,2,3,4,5 και V μπορούν να ληφθούν και εδώ ως σημεία της πολυγωνικής γραμμής . Από την αυτοτελή αλυσίδα τριγώνων προκύπτει, σύμφωνα και με το ακόλουθο σχήμα, η απαιτούμενη για τη χάραξη του άξονα του σήραγγα **K-e**, γωνία α ή το μήκος του σήραγγα **K-e** επίσης άμεσα .

$$\tan a = \frac{h_f * \sin b - \overline{fe} * \sin(b + g)}{\overline{fe} * \cos(b + g) - h_f * \cos b + kh}$$

$$\overline{ke} = L = \sqrt{[h_f * \sin b - \overline{fe} * \sin(b + g)]^2 + [\overline{fe} * \cos(b + g) - h_f * \cos b + kh]^2}$$

$$\overline{hf} = \overline{ab} \cdot \frac{\sin(bac) * \sin(bca) * \sin(def) * \sin(gdf) * \sin(kgf)}{\sin(abc) * \sin(bdc) * \sin(cfd) * \sin(gdf) * \sin(ght)}$$



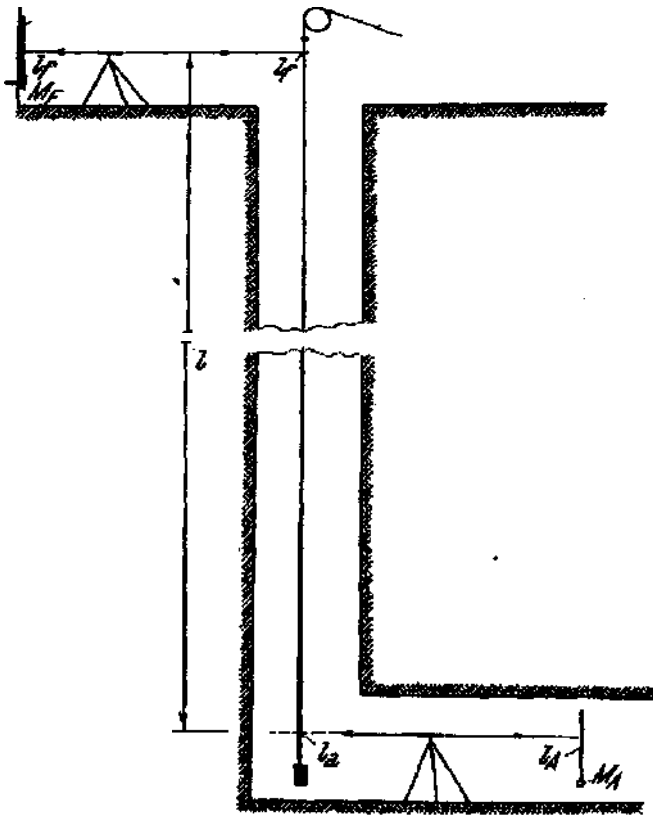
2.4. Χάραξη Ύψους

Σε σήραγγες οι οποίες βρίσκονται σε μεγάλο βάθος, η χάραξη του ύψους αρχίζει με τη μέτρηση της στοάς . Για την μέτρηση, απαιτούνται δύο όργανα ισοπέδωσης, πάσσαλοι και μετροταινία **20** ή **50m** . Καταρχήν, δένουμε ένα βάρος **5-10 kg** στο άκρο της μετροταινίας μέσα στη στοά . Οι μετρήσεις εκτελούνται όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα . Λαμβάνεται ο μέσος όρος **2-3** μετρήσεων και έτσι προσδιορίζεται η διαφορά ύψους μεταξύ των δύο οργάνων Εάν l_f και l_a είναι οι αντίστοιχες αναγνώσεις τότε προκύπτουν οι εξής σχέσεις .

$$l_f = \frac{[l_{fi}]}{i}$$

όπου, i ο αριθμός των αναγνώσεων

$$l_a = \frac{[l_{ai}]}{i}$$



Η διαφορά ύψους μεταξύ των δύο οργάνων υπολογίζεται από την σχέση $I = l_f - l_a$.

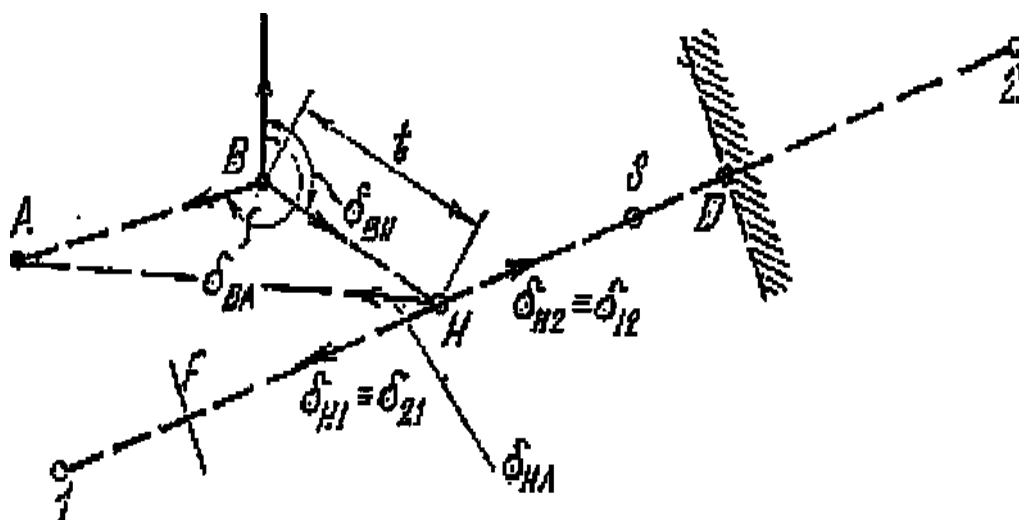
Για την χάραξη του ύψους, χρειαζόμαστε προπάντων ένα σταθερό σημείο ύψους κοντά στη στοά, το οποίο χρησιμεύει για την μέτρηση του ύψους της στοάς . Εάν F το ανώτερο και A το κατώτερο σταθερό σημείο ύψους, M_F το ύψος του σημείου F πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, l_f η αντίστοιχη ανάγνωση και l_a η ανάγνωση στον πάσσαλο στο σημείο A τότε ισχύει η εξής σχέση . $M_A = M_F + l_f - I - l_a$

όπου, I είναι η συγκριτική τιμή της διαφοράς ύψους που μετρείται με την μετροταινία . Περιγράφεται, με λίγα λόγια, η χάραξη ύψους σε χώρους πεπιεσμένου αέρα .

2.5. Μέτρηση της θέσης της εσωτερικής επένδυσης της σήραγγας

Ο άξονας του υπόγειου σιδηροδρόμου προσδιορίζεται, στο γεωδαιτικό σύστημα συντεταγμένων με εξισώσεις ευθειών και καμπύλων, όπου είναι γνωστές και οι συντεταγμένες των σημείων του άξονα ανά **20** ή **50** μέτρα .

Κατά την διάρκεια των κατασκευαστικών εργασιών, η πορεία διάνοιξης της σήραγγας και η θέση της εσωτερικής επένδυσης (εσωτερικός δακτύλιος) της σήραγγας πρέπει να ελέγχεται πάντοτε . Ο έλεγχος αυτός βασίζεται στη χάραξη του άξονα της σήραγγας . Τους σκοπούς της χάραξης εξυπηρετούν τα σταθερά σημεία της οριζοντίου και του ύψους, που βρίσκονται στο κατώτερο τμήμα . Δίνεται η ακόλουθως σχηματική κατάσταση .



Έστω, τα σημεία **1** και **2** ότι είναι δύο σημεία του άξονα του, υπό κατασκευή, σήραγγα όπου κοντά σε αυτά βρίσκονται τα οριζοντίως χαραχθέντα σταθερά σημεία **A** και **B** του δικτύου μετρήσεων . Επίσης, εάν υποθέσουμε πως το τμήμα του άξονα μεταξύ των σημείων **1,2** είναι ευθεία γραμμή, τότε υπό αυτές τις συνθήκες είναι δυνατές δύο περιπτώσεις .

Στην πρώτη περίπτωση, το σημείο **1** μπορεί να χαραχθεί άμεσα από το **A** ή από το **B** ενώ στη δεύτερη και συνηθέστερη περίπτωση, έχουμε τη δυνατότητα να χαραχούμε από το **B** ένα σημείο **H** ανάμεσα στα **1, 2** της ευθείας .

Καταρχήν παρακάτω θα περιγραφεί η γενική περίπτωση, όπου οι μετρήσεις και οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται ως ακολούθως .

- Ø Καθορίζονται υπολογιστικά οι συντεταγμένες του βοηθητικού σημείου **H** της ευθείας **12** . Προϋπόθεση εδώ είναι πως το **H** δεν πρέπει να απέχει από το **B**, από το οποίο και χαράσσεται, περισσότερο από το μήκος μιας μετροταινίας **20m** και επίσης πως το **H** βρίσκεται περίπου στη διχοτόμο της απόστασης **W** και πως υπάρχει η δυνατότητα προσεγγίσεως και του **A** από το **H** .
- Ø Υπολογίζονται από τις συντεταγμένες, οι γωνίες κατευθύνσεως δ_{12} , δ_{AB} και δ_{BH} όπως και η απόσταση $t = (BH)$.
- Ø Με το θεοδόλιχο στο **B** σκοπεύουμε μετά το **A** και διαβάζουμε τον οριζόντιο κύκλο. Έστω **I_A** το αποτέλεσμα και μετά βάζουμε στο όργανο την ένδειξη $I_A + \delta_{BH} - \delta_{BA}$.

- Ø Αφού καθορίστηκε έτσι η κατεύθυνση, ο δείκτης τοποθετείται έτσι ώστε η απόσταση από το B να είναι ακριβώς t .
- Ø Μετά επαναλαμβάνεται η χάραξη αλληλοδιαδόχως στις θέσεις I και II τηλεσκοπίου και ο δείκτης τοποθετείται στο μέσον των δύο σημείων που καθορίζονται με τον τρόπο αυτό.
- Ø Μετά τη χάραξη του σημείου H, τοποθετείται ο θεοδόλιχος στη θέση του δείκτη και ο δείκτης στη θέση του θεοδόλιχου. Σκοπεύουμε το B και διαβάζουμε την τιμή της κατεύθυνσης I_B .
- Ø Αφού είναι γνωστό το I_B , τοποθετούμε τον θεοδόλιχο στην ανάγνωση $I_A = I_B + \delta_{HA} - \delta_{HB}$. Εάν η τιμή αυτή αποκλίνει από την σωστή, περίπου στις 4"-5" τότε ο υπολογισμός και η χάραξη του σημείου H είναι ορθή. Εάν η απόκλιση όμως είναι μεγαλύτερη επαναλαμβάνονται οι μετρήσεις και οι υπολογισμοί.
- Ø Μετά τον έλεγχο ο θεοδόλιχος τοποθετείται στην ανάγνωση του οριζόντιου κύκλου $I = I_B + \delta_{HI} - \delta_{HB}$ και ο δείκτης σε ένα οποιοδήποτε προσιτό και καλά φωτιζόμενο σημείο F.
- Ø Μετά γυρίζουμε το όργανο κατά 180° , οπότε προκύπτει μια ανάγνωση $I_2 = I_1 + 180^\circ$ και κατευθύνουμε την διαφορά στο D. Ακολούθως, λαμβάνουμε την απόσταση (FD) ίση με περίπου 50m. Έπειτα, χαράσσονται τα σημεία F & D στη θέση τηλεσκοπίου I. Ακολουθεί η σκόπευση του σημείου B στη θέση τηλεσκοπίου II και η ανάγνωση του οριζόντιου κύκλου. Έστω, πως διαβάζουμε μια τιμή I_B' . Μετά, τοποθετούμε το τηλεσκόπιο σε μια τιμή $I' = I_B' + \delta_{HI} - \delta_{HB}$. Στη θέση αυτή του τηλεσκοπίου δεν είναι ορατός συνήθως ο δείκτης που χαράχθηκε προηγουμένως γι' αυτό και πρέπει να τοποθετήσουμε ένδειξη στο μέσον της αποκλίσεως. Με τον ίδιο τρόπο χαράσσεται στη θέση τηλεσκοπίου II το σημείο D.

Εάν το σημείο 1 είναι άμεσα ορατό από τα A και B, η χάραξη γίνεται εύκολα. Στην περίπτωση αυτή υπολογίζουμε, εφόσον η χάραξη γίνεται π.χ. από το B, καταρχήν την απόσταση (B1) και μετά από τις συντεταγμένες του σημείου, τις γωνίες κατευθύνσεως των γραμμών (AB) και (B1). Η χάραξη του σημείου γίνεται σε δύο θέσεις του τηλεσκοπίου, όπου διενεργούμε τη σήμανση στο μέσον μεταξύ των έτσι λαμβανομένων σημείων. Μετά τοποθετούμε τον θεοδόλιχο στο σημείο αυτό, και κατευθύνουμε το τηλεσκόπιο στη κατεύθυνση 12, ώστε η δίοπτρα να βλέπει το σημείο D. Έτσι χαράσσεται η ευθεία 12.

Ακολούθως, η μέτρηση της θέσεως του τελευταίου δακτυλίου διενεργείται στις εξής φάσεις.

- Ø Με το θεοδόλιχο στο σημείο H, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, παρατηρούμε τον δείκτη που τοποθετείται στο σημείο D, όπου βλέπουμε στο μέσο του τελευταίου δακτυλίου το βοηθητικό σημείο S. Αφού, μετρήσουμε την απόσταση του από το H και τοποθετήσουμε τον δείκτη στο σημείο H και το όργανο στο S και από το σημείο αυτό σκοπεύσουμε το H, κάνουμε την ανάγνωση στο όργανο.
- Ø Έστω η τιμή της ανάγνωσης αυτής I_H . Με περιστροφή του τηλεσκοπίου κατά 90° , τοποθετείται ο θεοδόλιχος στην ένδειξη $I_H + 90^\circ$ του οριζόντιου κύκλου, έτσι χαράξαμε την κάθετη στη γραμμή 12 κατεύθυνση.
- Ø Σημειώνουμε τα σημεία τομής των ευθειών που βρίσκονται στο κάθετο επίπεδο με το δακτύλιο.

- Ø Μετράμε τώρα την απόσταση των πρανών από την μπροστινή πλευρά του δακτυλίου. Οι αποστάσεις σημειώνονται με **S_j** (δεξιά) και **S_b** (αριστερά) . Η διαφορά **S_j - S_b** σημειώνεται με το αλγεβρικό της σημείο στην κατάλληλη πλευρά . Εάν π.χ., **S_j = 435 mm** και **S_b = 446 mm** τότε σημειώνουμε στην αριστερή πλευρά **+11** .
- Ø Μετά προσδιορίζεται το μέσο του δακτυλίου ως και η οριζόντια απόκλιση από τον άξονα του σήραγγα .
- Ø Οι συντεταγμένες του μέσου αυτού σημείου προσδιορίζονται υπολογιστικά .
- Ø Η κατεύθυνση της προόδου του δακτυλίου, υπολογίζεται συναρτήσει της διαφοράς αποστάσεως μεταξύ των δύο πρανών και της διαφοράς **S_b - S_j** . Το επίπεδο του δακτυλίου αποκλίνει από εκείνο της κατεύθυνσης **12** κατά μία τιμή Δδ :

$$\Delta_d = \arctan \frac{S_b - S_j}{d}$$

- Ø Η κλίση του δακτυλίου % λαμβάνεται από τον τύπο **e = a / b** όπου, **e** = σε **mm** και **b** = σε **m** .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Προσεγγιστικές Μεθόδους Υπολογισμού Φορτίων Σε Εδαφικά Υλικά

3.1. Προσδιορισμός Των Εδαφικών Πίεσεων Της Σήραγγας

3.1.1. Αίτια και μορφές των εδαφικών πιέσεων, επί της οροφής της σήραγγας

Οι ωθήσεις στις οποίες υπόκεινται οι υπόγειες κατασκευές προέρχονται από την πίεση του εδάφους και του νερού . Επιδράσεις ώθησης από την κυκλοφορία οχημάτων πάνω από τη σήραγγα, απασχολούν μόνο τις περιπτώσεις σηράγγων που κατασκευάζονται αμέσως κάτω από το κατάστρωμα δρόμων και γενικώς στις περιπτώσεις όπου το τεχνικό έργο κατασκευάζεται σε χαλαρά εδάφη .

Το βάρος των υπερκείμενων εδαφικών μαζών εξασκεί επί της οροφής του κενού χώρου, πίεση υπό την μορφή διανεμημένων ωθήσεων . Στην πίεση αυτή αντιδρούν οι δυνάμεις συνοχής και οι δυνάμεις τριβής του πετρώματος από τις οποίες εξαρτάται και η αντοχή του εδάφους . Οι δυνάμεις αυτές (δυνάμεις αντίστασης) εκδηλώνονται σαν παθητικές δυνάμεις, σε περιορισμένη κλίμακα, προ της διάνοιξης του κενού χώρου, διότι παρεμποδίζονται από τις υπάρχουσες γειτονικές μάζες του πετρώματος . Μόλις γίνει, όμως, η διάνοιξη του κενού χώρου εντός του εδάφους, το υπόψη έδαφος μπορεί, λόγω παραμόρφωσης, να πιέζει τον κενό χώρο και επομένως αυτός, πρέπει να διασφαλιστεί από τις πιέσεις αυτές . Η πίεση αυτή, που ασκείται από το έδαφος, καλείται **εδαφική πίεση** .

Ο προσδιορισμός της εδαφικής πίεσης αποτελεί έναν από τους πλέον πολύπλοκους προβληματισμούς της μηχανικής . Η δυσκολία έγκειται στο γεγονός, πως οι προκαλούμενες πιέσεις εξαρτώνται από το έδαφος και κατά μεγάλο ποσοστό, από το μέγεθος του κενού χώρου και τέλος από το είδος και τον τρόπο της διάνοιξης . Σημαντικό στοιχείο για τον προσδιορισμό της πίεσης αυτής αποτελεί και το χρονικό διάστημα που παρέρχεται από την στιγμή διάνοιξης του κενού χώρου . Δεν πρέπει, επίσης, να παραληφθούν και οι αρχικές τάσεις που προέρχονται από την προϊστορία του πετρώματος . Στοιχεία, όπως χαράδρες, πτυχές και ρωγμές στο έδαφος αποτελούν σημάδια για το σε ποιες πιέσεις έχει αυτό εκτεθεί κατά την διάρκεια της ιστορικής του εξέλιξης .

Η **μηχανική του εδάφους** λαμβάνει υπόψη της, μόνο τις κάθετες τάσεις που δημιουργούνται από τα βάρη των εδαφικών μαζών καθώς και τις οριζόντιες τάσεις που προσδιορίζονται από τον λόγο **Poisson** ή και τη θεωρία **Rankine** . Στην **μηχανική**, όμως, των **πετρωμάτων** αυτές οι σχέσεις δεν γίνονται παραδεκτές κατά τον **Talobre** .

Κατά τον **Terzaghi**, η πίεση του εδάφους είναι το βάρος των εδαφικών μαζών που βρίσκονται πάνω από το σήραγγα σε ορισμένο ύψος . Πάνω από τον κενό χώρο σχηματίζεται ένας ακανόνιστος φυσικός θόλος, που δεν οδηγεί όμως αναγκαστικά στην πλήρη πτώση του κενού χώρου .

Αντίθετα με την προηγούμενη, η εδαφική πίεση είναι αυτή, που εξασκείται στα τοιχώματα κενού χώρου από την πλαστική εδαφική μάζα . Το μέγεθος της εδαφικής πίεσης είναι γενικά ανεξάρτητο από την αντοχή και τον χρόνο γένεσης των εδαφικών στρωμάτων, μόνο η διατομή της επηρεάζεται από τον τύπο των στρωμάτων . Αντιθέτως, η πίεση του εδάφους εξαρτάται ουσιωδώς από την αντοχή και τον χρόνο γένεσης των υποκείμενων μαζών .

Ο **Rziha**, κλασικός στην κατασκευή σηράγγων, υποστηρίζει ότι « Η αληθής τέχνη του μελετητή σήραγγας έγκειται στην πρόληψη της ανάπτυξης πιέσεων του βουνού . Αυτή είναι και η αποτελεσματικότερη επιστήμη πέρα από την διευθέτηση των ήδη εμφανιζόμενων πιέσεων του εδάφους » .

Σύμφωνα με τον **Rabcewicz**, οι αιτίες γένεσης των πιέσεων εδάφους κατατάσσονται στις ακόλουθες ομάδες .

- Ø Χαλάρωση των εδαφικών μαζών .
- Ø Το βάρος μαζών που βρίσκεται πάνω από τον κενό χώρο .
- Ø Τεκτονικές δυνάμεις .
- Ø Μεγέθυνση του όγκου των μαζών λόγω χημικής ή φυσικής διόγκωσης αυτών .

Από τις πιο πάνω αναφερθείσες αιτίες, δημιουργούνται τα ακόλουθα τρία είδη πιέσεων εδάφους .

- Ø Πιέσεις χαλάρωσης των εδαφικών μαζών .
- Ø Πραγματική πίεση εδάφους .
- Ø Πίεση λόγω διόγκωσης .

Τα ανωτέρω τρία είδη πιέσεων μπορούν να υποδιαιρεθούν περαιτέρω, ανάλογα με τις συνθήκες εμφάνισής τους, την δυνατότητα εκδήλωσής τους ως και ανάλογα με το μέγεθος τους. Αναφορικά, οι πιέσεις αυτές απαιτούν διάφορες μεθόδους κατασκευής της σήραγγας . Πολλές φορές, οι ανωτέρω πιέσεις εμφανίζονται από κοινού, κυρίως οι πραγματικές πιέσεις και οι πιέσεις διόγκωσης . Ποια πίεση θα εμφανιστεί σε μία ορισμένη περίπτωση, εξαρτάται κυρίως από το είδος του πετρώματος και από το βάθος της σήραγγας .

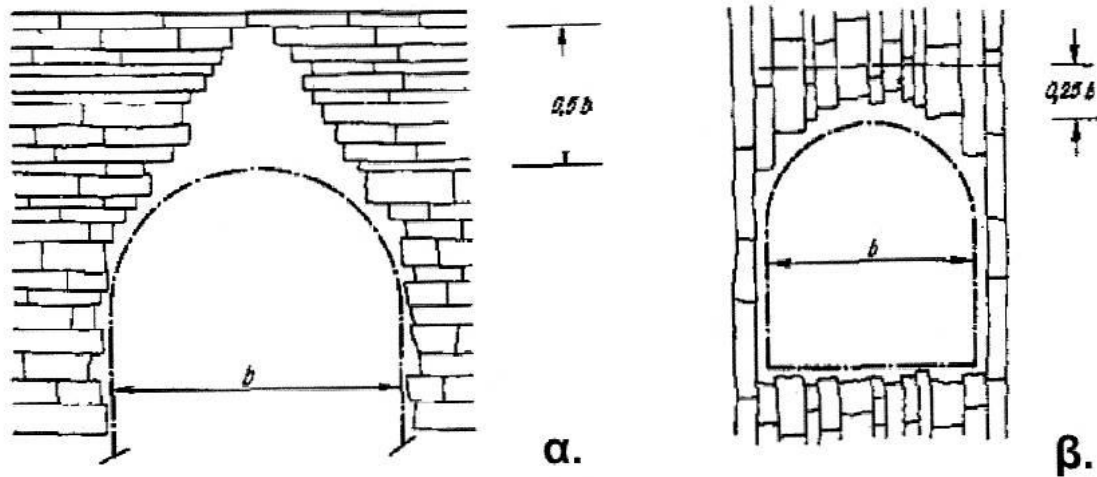
Ανάλογα με το πώς συμπεριφέρεται το πέτρωμα στις πιέσεις που δέχεται από τα υπερκείμενα στρώματα, ο **Rabcewicz** διακρίνει τρία είδη υπεδαφικών πετρωμάτων .

- Ø Σταθερά πετρώματα .
- Ø Ψευδοσταθερά, μαλακά και αποσταθρωμένα πετρώματα .
- Ø Χαλαρά πετρώματα .

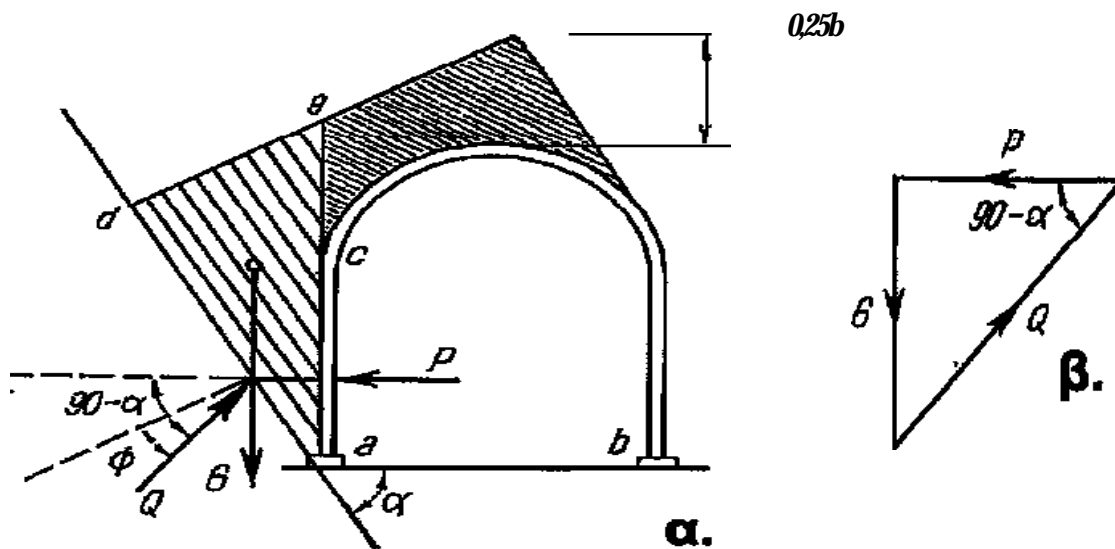
3.2. Μέθοδοι προσέγγιστικού προσδιορισμού των εδαφικών πιέσεων

Για την εμπειρική εκτίμηση της κάθετης πίεσης του εδάφους ο **Terzaghi** δίνει τα εξής στοιχεία .

Ø Σε στερεό βουνό προκύπτει η μέγιστη φόρτιση από το μέγιστο άνοιγμα που μπορεί να δημιουργηθεί στο έδαφος από την διάνοιξη, χωρίς υποστήριξη .



- α) Οριζόντια στρωμάτωση του μέγιστου ανοίγματος πάνω από έναν αστήριχτο κενό χώρο
- β) Κάθετη στρωμάτωση η οποία υπολογίζεται ως $0.25 * b$ (b : το πλάτος του κενού χώρου)



Φόρτιση για λοξή στρωμάτωση

Η λοξή στρωμάτωση εμφανίζεται ανάλογα με την γωνία και την πλευρική πίεση και της οποίας το ύψος της κάθετης συνιστώσας είναι και εδώ $0.25b$.

Ø Σε όχι στρωματωμένο βουνό με μέτρια εμφάνιση χασμάτων, χαραδρών, μπορεί το ύψος της κάθετης συνιστώσας και εδώ να θεωρηθεί ίσο με **0.25b** .

Ø Σε χαλαρές μάζες, όπως πετρώδη βουνά που βρίσκονται κοντά σε περιοχές αποθέσεων και στα οποία παρατηρούνται όλες οι βαθμίδες αποσάθρωσης, η ενεργούσα επί της οροφής του κενού χώρου πίεση δεν επηρεάζεται από το υπερκείμενο ύψος των εδαφικών μαζών παρά μονάχα από το πλάτος και το ύψος του κενού χώρου .

Η τριβή του ενός κόκκου με τον άλλο επιφέρει την χαρακτηρισμένη ως «**δράση του θόλου**» **ενέργεια**, η οποία εκτείνεται γενικώς μέχρι ύψους **1.5*B**, όπου $B = b + κ$. Εδώ αρκεί μία πολύ μικρή κίνηση προς τα κάτω και πέφτει η επί της οροφής δρώσα πίεση πολύ κάτω από το βάρος του άνωθεν κείμενου εδαφικού τομέα (**h_{min}**), ενώ η πίεση αυτή λόγω και άλλων περαιτέρω κινήσεων ανεβαίνει ξανά και παραμένει πάντοτε σημαντικά κάτωθεν του βάρους των άνωθεν κείμενων εδαφικών μαζών .

Συνεπώς η σχέση $h_p = α * B$, αποτελεί την μέγιστη τιμή του **h_p** και εξαρτάται κατά τον **Terzaghi** από το εάν η στρωμάτωση κείται κάτω ή πάνω από την επιφάνεια του υπόγειου νερού καθώς και από το εάν το έδαφος βρίσκεται σε πυκνή ή χαλαρή κατάσταση . Οι τιμές του συντελεστή α λαμβάνονται από πίνακα, οι δε τιμές της κάθετης μετατόπισης ανέρχονται στο *πυκνό έδαφος* αρχικά **0.09B** και τελικά **0.15B** ενώ στο *χαλαρό έδαφος* αρχικά **0.02B** και τελικά **0.25B**) .

Όπως δείχνει η πείρα, η πραγματική πίεση οροφής σε αμμώδη και κροκαλοπαγή εδάφη βρίσκεται πολύ πιο κοντά στην αρχικά ελάχιστη, παρά κοντά στη μέγιστη τελική . Επίσης, ευρέθη πως η πίεση του εδάφους αυξάνει βαθμιαία μέχρι ενός ορισμένου χρονικού σημείου . Οι πρακτικά δυνάμενες να εκτιμηθούν τιμές της πίεσης οροφής, κυμαίνονται εντός ευρέων ορίων . Τα όρια αυτά εκτείνονται από μία τιμή αντίστοιχη του **0.25b** σαν κατώτερο όριο μέχρι πολλαπλασίων τιμών αυτής . Διάφοροι παράγοντες παίζουν ρόλο στο μέγεθος της τιμής αυτής, όπως ο βαθμός κονιορτοποιήσεως του εδάφους και η περιεκτικότητα σε υγρασία του εδάφους .

Για εδαφική μάζα χωρίς εσωτερική συνοχή αλλά με αξιόλογη εσωτερική τριβή, όπως ξηρά άμμος και κροκαλοπαγή εδάφη, υπάρχει για την πίεση της οροφής, που παρίσταται διανυσματικά με βέλη από την οροφή και διεύθυνση προς τον κενό χώρο, ο ακόλουθος τύπος .

$$p = \frac{g}{h} * b^2 * \cot \varphi$$

όπου, **b** = το εύρος του κενού χώρου

φ = η γωνία εσωτερικής τριβής

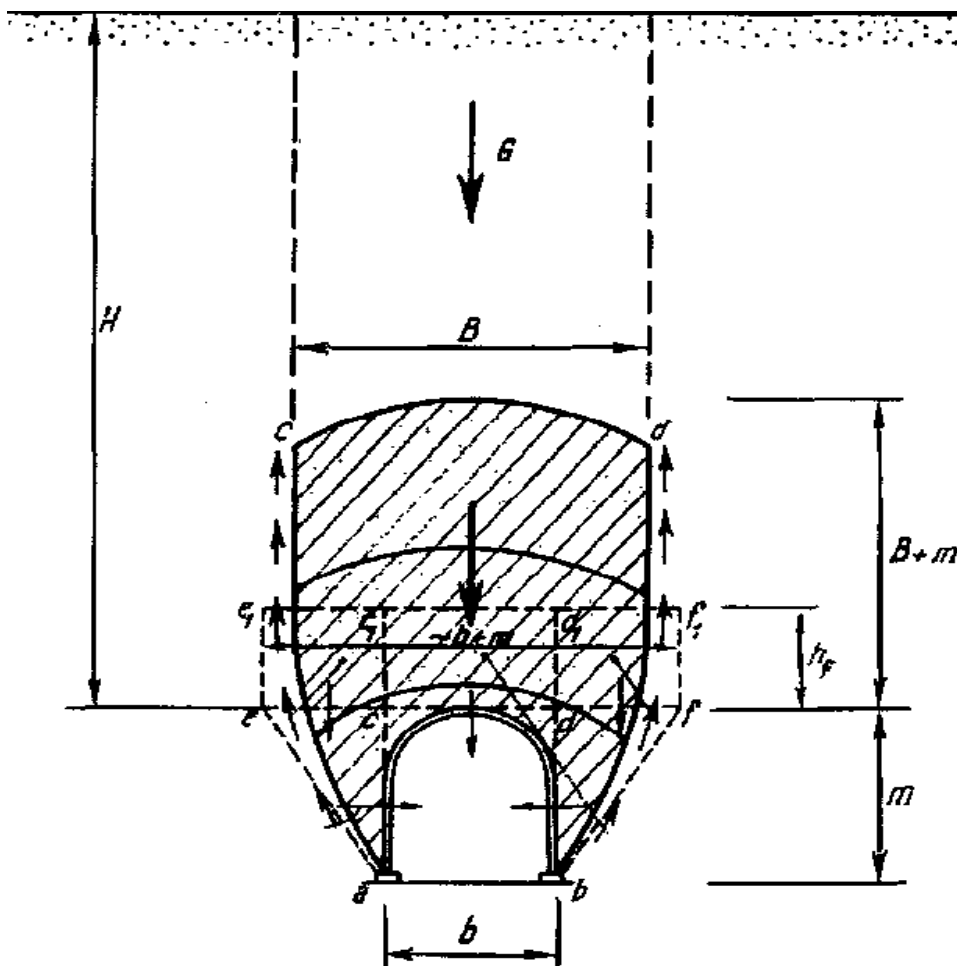
γ = το φαινόμενο βάρος της εδαφικής μάζας

Ο παραπάνω τύπος έχει το μειονέκτημα ότι δίνει τιμή πίεσης άπειρη όταν $\varphi=0$, γεγονός που είναι αδύνατο γιατί το μέγιστο της γεωστατικής πίεσης είναι $p = \gamma * h$.

Η ισχύς του τύπου εκτείνεται, προφανώς μέχρι την τιμή $h = \frac{b}{2} * \cot f$, που το βέλος της πίεσης φθάνει μέχρι την επιφάνεια της γης.

Το όριο ισχύος του τύπου μετατοπίζεται, επίσης, κατά μία τιμή $H = X + \frac{b}{2} * \cot f$, όπου X είναι μία τιμή μεταξύ 5 - 10 μέτρα (υστέρηση βάθους x).

Οι τιμές που δίδονται στον Πίνακα 11 είναι ενδεικτικές εμπειρικές τιμές, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση των πιέσεων του εδάφους.



Δράσεις του θόλου άνωθεν του κενού χώρου

3.3. Θεωρίες υπολογισμού των εδαφικών πιέσεων, βάσει διαφόρων παραδοχών, που λαμβάνουν υπόψη την επίδραση του βάθους

Από τα ήδη αναφερόμενα και ιδίως από την θεωρία του **Fenner**, προκύπτει πως για την πρακτική μέτρηση επενδύσεων στα σήραγγα σημαντικό ρόλο παίζει το γεγονός εάν η διάνοιξη πρόκειται να πραγματοποιηθεί σε στερεό, ψευδοστερεό ή χαλαρό έδαφος .

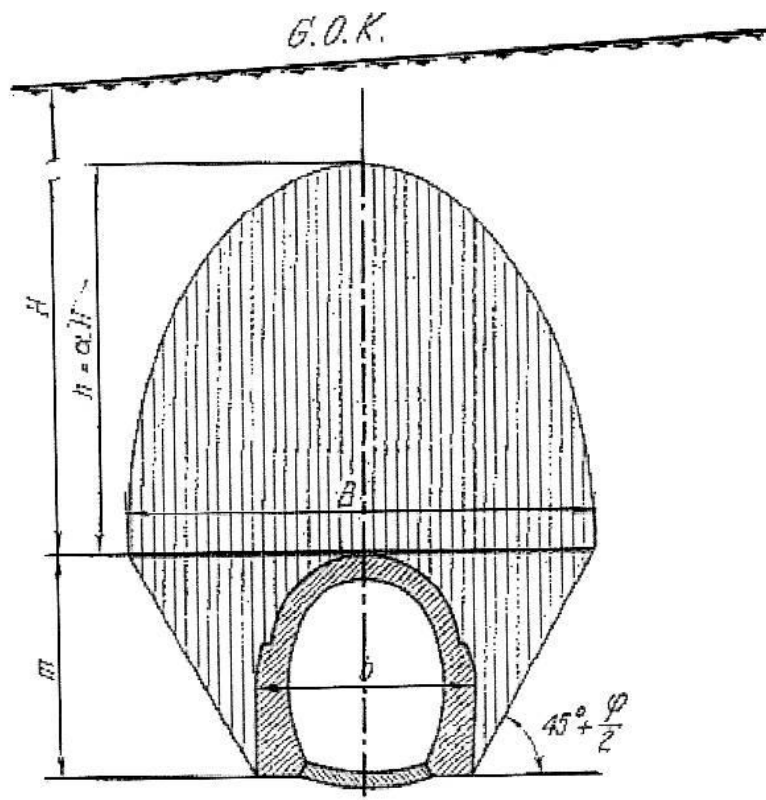
Στο **στέρεο έδαφος** και γενικά για τάσεις που έχουν τιμή κάτω του ορίου ελαστικότητας, ο προστατευτικός μανδύας στα σήραγγα σχηματίζεται ανεξάρτητα από το ύψος των υπερκείμενων εδαφικών μαζών . Στις περιπτώσεις αυτές εφαρμόζονται εκείνες οι πρακτικές θεωρίες οι οποίες δεν λαμβάνουν υπόψη τους την επίδραση του βάθους .

Σε **πλαστικά ή ψευδοστερεά βουνά και σε κοκκώδη εδάφη**, αντιθέτως, η υπό συνθήκας δημιουργία μόνιμων παραμορφώσεων και η επίδραση του βάθους στην πίεση του εδάφους είναι αισθητή και για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται θεωρίες που λαμβάνουν υπόψη την επίδραση του βάθους . Έτσι, οι θεωρίες μέτρησης χωρίζονται σε δύο μεγάλες ομάδες αντιστοίχως .

§ 3.3.1. Θεωρία Bierbaumer

Η εδαφική μάζα που ορίζεται από μία παραβολή έχει ύψος $h = \alpha * H$. Για τον υπολογισμό του παράγοντα α χρησιμοποιούνται σχεδόν ισοδύναμες μέθοδοι ενώ η τιμή του α προκύπτει από τον εξής τύπο .

$$\alpha = 1 - \frac{\tan f * \tan^2(45 - \frac{f}{2}) * H}{b + 2 * m(45 - \frac{f}{2})}$$



Επιφάνεια πίεσης κατά Bierbaumer

Επιπλέον, η τιμή του α έχει τις ακόλουθες δύο οριακές τιμές .

- Ø Όταν το ύψος των υπερκείμενων μαζών είναι πολύ μικρό τότε $\alpha = 1$.
- Ø Όταν το ύψος των υπερκείμενων μαζών είναι πολύ μεγάλο π.χ. μερικές εκατοντάδες μέτρα, όπου $H > 5B$, τότε η τιμή του α είναι σταθερή και ίση με

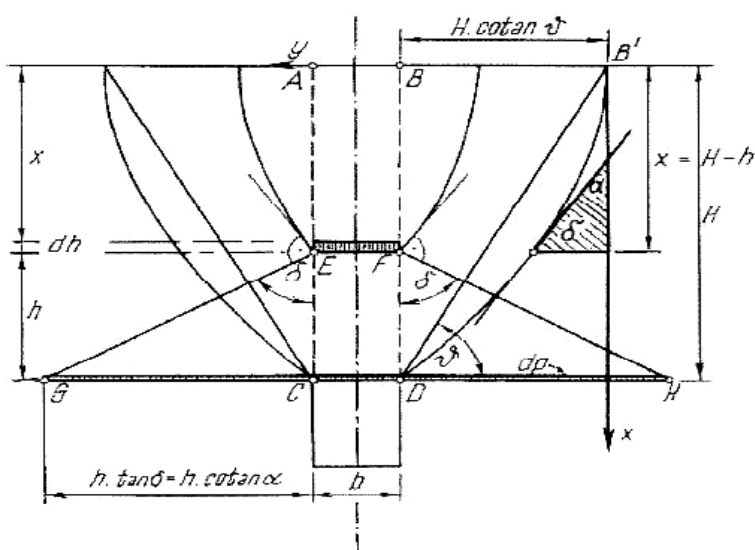
$$a = \tan^4\left(45 - \frac{\phi}{2}\right)$$

Η τιμή του α , δηλαδή, είναι ανεξάρτητη του ύψους των υπερκείμενων μαζών και η οποία για σήραγγα διπλής γραμμής, δίνεται από τον Πίνακα 4 .

Γενικώς, η ορθότητα των ωθήσεων του **Bierbaumer** δεν έχει αποδειχθεί ακόμη με βεβαιότητα .

§ 3.3.2. Θεωρία Eszro

Η θεωρία αυτή λαμβάνει υπόψη το εύρος του κενού χώρου της σήραγγας . Οι δε παραδοχές της θεωρίας φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα .



Η θεωρία ξεκινά από το γεγονός πως η διάνοιξη του κενού χώρου δημιουργεί επιφάνειες ρηγμάτων οι οποίες φθάνουν μέχρι την επιφάνεια του εδάφους . Η κλίση των επιφανειών αυτών είναι μικρότερη στο κάτω μέρος από ότι ψηλότερα, όπου έχει μεγάλη τιμή και κοντά στην επιφάνεια και έχει διεύθυνση σχεδόν κάθετη προς τα πάνω . Το ρήγμα εμφανίζεται επομένως, κατά μήκος μιας καμπύλης επιφάνειας της οποίας το ίχνος είναι κατά **Eszro** μία παραβολή (καμπύλη δευτέρας τάξεως) .

Προς χαρακτηρισμό των ιδιοτήτων του εδάφους, ο **Eszro** θεωρεί εκείνη την γωνία θ (παραπάνω σχήμα), την οποία περικλείει η οριζόντιος με μία ευθεία, που συνδέει το γωνιακό σημείο της οροφής του κενού χώρου με το σημείο τομής του ίχνους της επιφάνειας των ρηγμάτων, με την επιφάνεια του εδάφους .

Η γωνία αυτή παρατηρείται καλά και στην φύση . Οι χαρακτηριστικές τιμές στερεότητας του εδάφους (σ , φ , c) μεταβάλλονται από στρώμα σε στρώμα και δεν προσδιορίζονται με ακρίβεια, ακόμα και μέσω δειγματοληψιών . Υπάρχει όμως, η δυνατότητα να μετρήσουμε την γωνία κλίσεως επί τόπου . Έτσι, η **ABB'** παριστά τον άξονα, το **B'** την κορυφή και το **D** ένα σημείο της παραβολής εκ των ανωτέρως γωνιακών σημείων της οροφής του κενού χώρου . Επειδή, $BB' = H * \cot\theta$ η εξίσωση της παραβολής γράφεται ως εξής .

$$H^2 = 2 * p * \cot q$$

Επομένως, η εξίσωση της παραβολής έχει την ακόλουθη μορφή . $y = \frac{\cot q}{H} * X^2$

Με τους συμβολισμούς του ανωτέρω σχήματος, παίρνουμε από το τρίγωνο του σχήματος, την εφαπτόμενη της παραβολής επί της επιφάνειας **EF**, σύμφωνα με τους παρακάτω τύπους .

$$\tan a = \frac{dy}{dx} = 2 * x * \frac{\cot q}{H} \qquad \frac{1}{\tan a} = \tan d = \frac{H * \tan q}{2 * (H - h)}$$

Στο παραπάνω σχήμα είναι H = το βάθος, **CD** = το εύρος του κενού χώρου, **CDAB** = το εδαφικό πρίσμα που φθάνει μέχρι την επιφάνεια του εδάφους . Η πίεση του στοιχειώδους στρώματος **EF**, το οποίο βρίσκεται σε ύψος h πάνω από τον κενό χώρο και έχει πάχος dh και βάρος $dp = dh * \gamma$, δεν διανέμεται απλώς έως την επιφάνεια **CD** αλλά έως της μεγαλύτερης **GH** και μάλιστα, σύμφωνα με την παραδοχή του **Eszro**, ομοιόμορφα . Το στοιχειώδες βάρος dp , το οποίο προέρχεται από το στρώμα που βρίσκεται σε ύψος h και πάχος dh , διανέμεται στην επιφάνεια οροφής εύρους $b + 2 * h * \tan\delta$. Από την ισότητα των βαρών προκύπτει ότι $(\gamma * b) * dh = \gamma * (b + 2 * h * \tan\delta) * du$, όπου du είναι το μέσο ύψος στην κατώτερη επιφάνεια **GH** . Η ολοκλήρωση των τιμών αυτών από την οροφή μέχρι την επιφάνεια του εδάφους, δίνει για την πλήρη πίεση οροφής, την παρακάτω σχέση .

$$p = g * \frac{b * \cot q}{\left[1 - \left(\frac{b}{h * \tan q}\right)^2\right]} * \left[\ln \frac{H * \tan q}{b} - 1 - \frac{b}{H * \tan q}\right]$$

$$p = g * \frac{b'}{\left(1 - \frac{b'}{H}\right)^2} * \left[\ln \frac{H}{b'} - 1 - \frac{b'}{H}\right] , \text{ με } b' = b * \cot\theta$$

H τιμή του θ , η χαρακτηριστική γωνία του πετρώματος, λαμβάνεται $q = 45 + \frac{f}{2}$, με συνηθισμένη τιμή την $\varphi = 63.5$ που δίνει $\tan\theta = 2.00$.

Στην εργασία του, ο ίδιος ο **Eszro**, παραδέχεται πως η υπολογιζόμενη πίεση, από την βάση της θεωρίας του στην πράξη, σαν τιμή δεν είναι χρήσιμη, επιτρέπει, όμως, τις μεταβαλλόμενες συνθήκες και λαμβάνοντας υπόψη τις κύριες παραμέτρους να έχουμε συγκριτικά συμπεράσματα πάνω στην πιθανή μεταβολή της πίεσης .

Σημείωση

Υπολογίζεται σε ποιο σημείο η πίεση πέφτει στο ήμισυ της υπολογιζόμενης βάσης της παραπάνω σχέσης . Γίνεται χρήση του Πίνακα 1 με $\theta = 63.5^\circ$ και με διάφορες γωνίες και διάφορα ύψη .

Ο **Eszro** μελετάει, επίσης, ποιες πιέσεις εμφανίζονται πάνω από κενούς χώρους με κλειστή διατομή (π.χ. στοές) . Η διαφορική εξίσωση ισορροπίας γράφεται, εάν ληφθεί υπόψη ένας κενός κυλινδρικός χώρος κυκλικής τομής **d** ως εξής .

$$g * \frac{d^2 * p}{4} * dh = g * d * m * (d + 2 * h * \tan d) * \frac{p}{4} = d * (d + 2 * h * \tan d)^2 * \frac{p}{4}$$

$$p = g * \int_0^H dm = \int_0^H \frac{g * d^2 * dh}{(d + 2 * h * \tan d)^2}$$

όπου, $d = \frac{H * \tan q}{2(H - h)}$

Έπειτα από την ολοκλήρωση τελικά έχουμε την σχέση .

$$p = \frac{d * \cot q}{\left(1 - \frac{d}{H * \tan q}\right)^2} * \left[1 - \frac{d}{\tan q} - \frac{d}{H * \tan q} * \ln \frac{H}{d} * \tan q\right]$$

Για να συγκρίνουμε την τιμή που βρίσκουμε από την σχέση $p = \frac{g}{h} * b^2 * \cot f$

με αυτήν που μας δίνει η σχέση $p = \gamma * h$ και η οποία ισχύει για γραμμικά εκτεινόμενο κενό χώρο, ανάγουμε αυτή έως ισομεγέθους επιφανείας κάνοντας χρήση του αριθμού **d = 1.128** ,

που προκύπτει από την σχέση $d = b * \sqrt{\frac{u}{p}}$.

Στον Πίνακα 2 αναγράφονται οι πιέσεις για $\theta = 63.5^\circ$ και διάφορες τιμές για τα **b** και **h** . Στην παρένθεση είναι οι τιμές που υπολογίζονται με την σχέση $p = \frac{g}{h} * b^2 * \cot f$

Η σύγκριση δείχνει πότε πάνω από τους γραμμικά εκτεινόμενους κενούς χώρους, οι πιέσεις είναι **3 - 4** φορές μεγαλύτερες από ότι πάνω από χώρους με κυκλική διατομή .

§ 3.3.3. Θεωρία Terzaghi

Ξεκινά από την παραδοχή, πως το έδαφος έχει εκείνη μόνο την υγρασία, η οποία εξασφαλίζει τέτοια συνοχή που επιτρέπει την διατήρηση των συνθηκών των στοών, μικρότερων διαστάσεων, σε κάθετη θέση χωρίς κατακρήμνιση . Η κίνηση των μαζών του εδάφους γύρω από τον κενό χώρο συνεχίζεται εφόσον ο κενός χώρος κατακρημνίζεται από την εγκατάσταση του προσωρινού . Η κίνηση επαρκεί για την εμφάνιση, στο έδαφος, των χαρακτηριστικών για την οριακή κατάσταση ολίσθησης πεδίων ολισθήσεως . Είναι λοιπόν, επόμενο να μπορούμε να προσδιορίσουμε το εύρος της υποχωρούσας μάζας, στο ύψος της οροφής της στοάς έως την βάση της γωνίας $45 + \frac{\phi}{2}$.

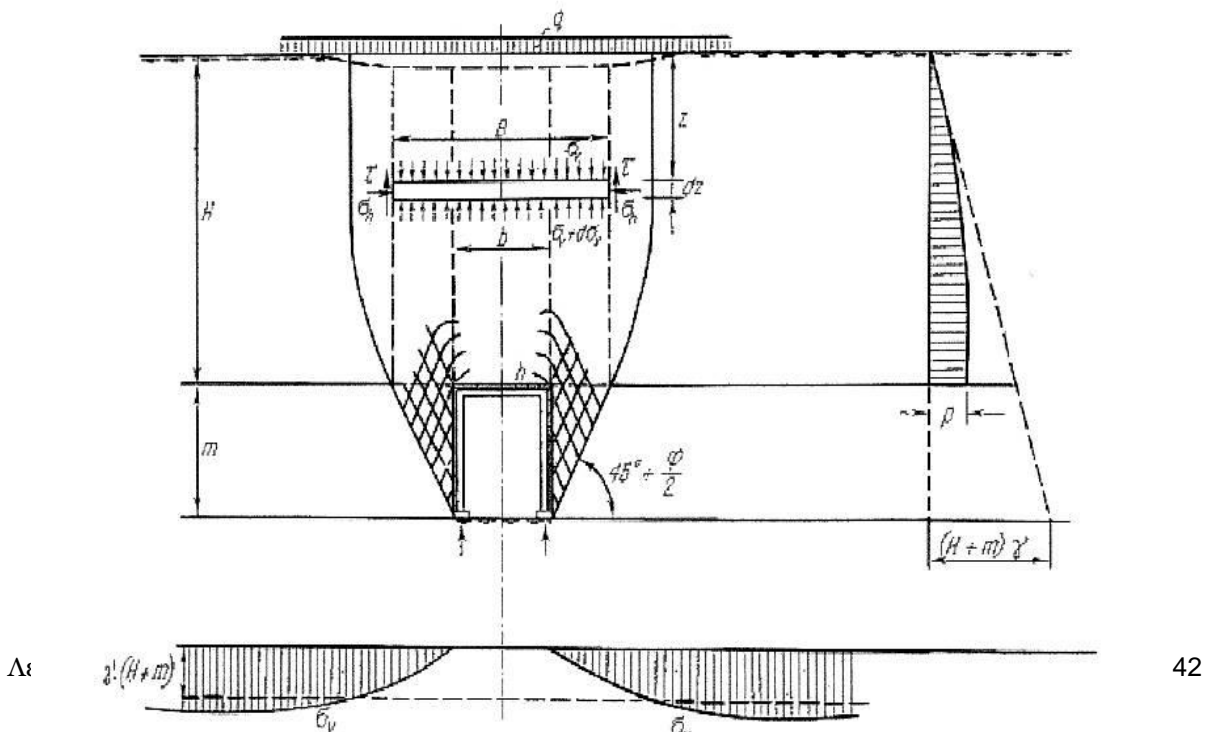
Το εύρος αυτό είναι το εξής . $B = 2 * \left[\frac{b}{2} + m * \tan\left(45 - \frac{\phi}{2}\right) \right]$

Εξάλλου, η υποχώρηση των εδαφικών μαζών παρεμποδίζεται από τον σχηματισμό του θόλου ο οποίος προεντοπίζεται από τον **Terzaghi** έως την βάση της εμφανιζόμενης στις κάθετες επιφάνειες ολίσθησης τριβής .

Οι κάθετες στα άκρα της λωρίδας εύρους B, μπορούν να ληφθούν σαν οι οριακές επιφάνειες κίνησης . Για την αντίσταση έναντι ολίσθησης κατά μήκος αυτών, ισχύει :

$$\tau = c + \sigma * \tan\phi = c + \sigma_h * \tan\phi$$

Εάν γ είναι το βάρος του εδάφους και υποθέσουμε πως έως την επιφάνεια του εδάφους δρα μία φόρτιση q ομοιόμορφα κατανομημένη και η οποία εκφράζει, τελικά, το λόγο των οριζοντίων προς τις κάθετες πιέσεις μέσω μίας, εμπειρικά προσδιορισμένης σταθεράς κ , τότε η έως της επιφάνειας ολίσθησης, δρώσα κανονική τάση χαρακτηρίζεται από την εμφανιζόμενη σε βάθος z , κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, κάθετη τάση σ_v είναι $\sigma_h = \kappa * \sigma_v$. Οι δυνάμεις που δρουν επάνω σε μία λωρίδα ύψους dh του πρίσματος εύρους B και σε οποιοδήποτε βάθος z , εμφανίζονται στο ακόλουθο σχήμα .



Η ισορροπία της περιγράφει την επόμενη σχέση .

$$B * g * dz = B * (s_v + d * s_v) - B * s_v + 2 * t * dz$$

Είναι $\sigma_h = k * \sigma_v$, $\tau = C + \sigma_h * \tan \varphi = C + k * \sigma_v * \tan \varphi$, οπότε η εξίσωση λαμβάνει την παρακάτω μορφή . $B * g * dz = B * (s_v + d * s_v) - B * s_v + 2 * c * dz + 2 * k * s_v * dz * \tan f$

$$\frac{ds_u}{dz} = g - \frac{2C}{B} - 2 * K * s_u * \frac{\tan f}{B}$$

Εάν πάρουμε $\zeta = 0$ τότε είναι και $s_u = q$, λαμβάνουμε σαν λύση της διαφορικής εξίσωσης την ακόλουθη σχέση .

$$s_u = \frac{B * (g - \frac{2c}{B})}{2 * k * \tan f} * \left[1 - e^{-k * \tan f * \frac{2z}{B}} \right] + q * e^{-k * \tan f * \frac{2z}{B}}$$

Με $c = 0$ και $q = 0$ έχουμε :

$$s_u = \frac{B * (g - \frac{2c}{B})}{2 * k * \tan f} * \left[1 - e^{-k * \tan f * \frac{2H}{B}} \right]$$

Εάν θέσουμε στην ανωτέρω εξίσωση την τιμή H, τότε η έκφραση για την πίεση του εδάφους γράφεται υπό την εξής μορφή .

$$p_u = \frac{B * g}{2 * k * \tan f} * \left[1 - e^{-k * \tan f * \frac{2H}{B}} \right]$$

Σε μεγαλύτερα βάθη δεν δρα, πλέον, ο σχηματισμός θόλου μέχρι την επιφάνεια του εδάφους . Κατά τον **Terzaghi**, η τιμή του **k** αυξάνει μέχρι ενός ύψους που αντιστοιχεί στο B από το **1.0** έως το **1.5** ενώ η κατάσταση τάσεως του ανώτερου στρώματος του εδάφους δεν επηρεάζεται μετά από ένα ύψος **2.5 * B**, ούτε ποτέ πάνω από αυτό το ύψος δεν εμφανίζεται πλέον ο σχηματισμός θόλου . Αντίστοιχα, η πίεση του εδάφους μπορεί να θεωρηθεί πως αποτελείται από δύο μέρη . Εάν **H₂** είναι εκείνο το ύψος μέχρι του οποίου φθάνει η δράση του θόλου και **H₁**, αντιθέτως, το ύψος τμήματος αυτού και της επιφάνειας του εδάφους, τότε μπορεί το δεύτερο αυτό τμήμα να ληφθεί ως εξωτερική φόρτιση $q = H_1 * \gamma$

Έως την βάση των παραδοχών της θεωρίας αυτής, προκύπτει για την πίεση που δρα στην οροφή, η σχέση .

$$p_u = \frac{B * g}{2 * k * \tan f} * \left[1 - e^{(-k * \tan f * \frac{2H_2}{B})} \right] + g * H_1 * e^{(-k * \tan f * \frac{2H_2}{B})}$$

Αυξανομένης της μετατόπισης της οροφής σε βαθύτερα ύψη, αυξάνει το ύψος **H₂** και εφόσον έχει τιμή, τουλάχιστον, ίση με το **1/5** του ολικού ύψους H, η επίδραση του δεύτερου μέλους, στην παραπάνω σχέση, γίνεται αμελητέα, ενώ η παρένθεση στο πρώτο μέλος, πλησιάζει προς την μονάδα . Σε πολύ μεγάλα βάθη η πίεση έχει την εξής τιμή .

$$p_{max} = \frac{g * B}{2 * k * \tan f} \quad \text{δηλαδή, γίνεται ανεξάρτητη του ύψους H .}$$

Κατά τον **Terzaghi**, η τιμή της σταθεράς **k** μπορεί να εξισωθεί με την μονάδα . Εάν, στον τύπο θέσουμε **k=1**, τότε εμφανίζεται μία γραμμική σχέση μεταξύ της πίεσης και του εύρους του κενού χώρου, οπότε ο τύπος ομοιάζει με την εξίσωση του **Protodjakonowschen** .

Η θεωρία του **Terzaghi** βάσει της θεμελιώδους εξίσωσης μπορεί να εφαρμοστεί στα συνεκτικά εδάφη . Στην περίπτωση αυτή, η πίεση θα δίνεται από τον ακόλουθο τύπο .

$$p_u = \frac{B * (g - \frac{2c}{B})}{2 * k * \tan f} * (1 - e^{-k * \tan f * \frac{2H}{B}})$$

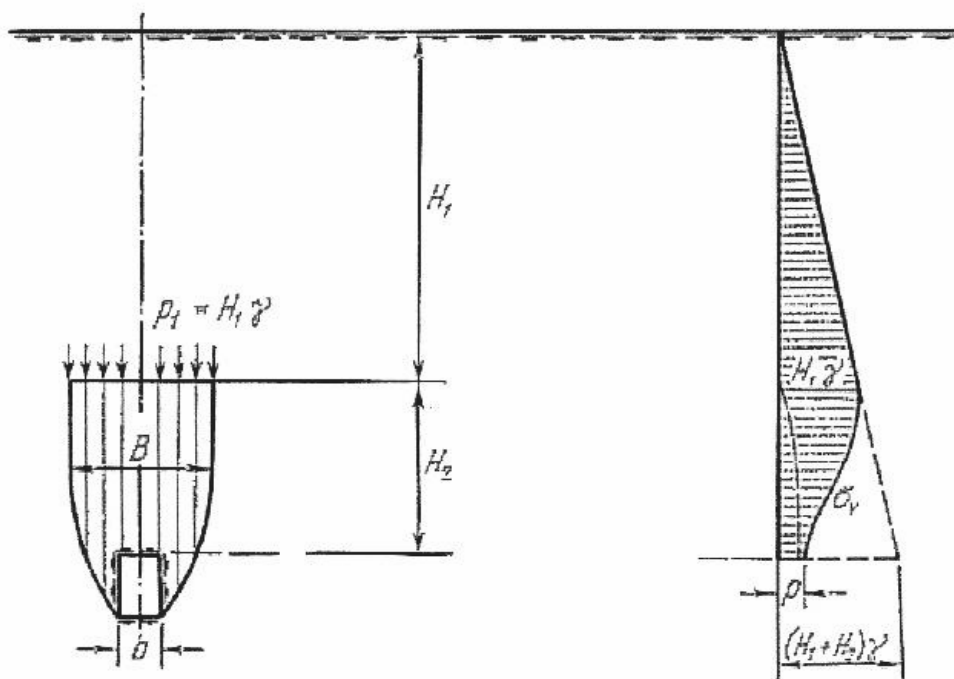
Εάν $B \leq \frac{2c}{g}$ τότε $g = \frac{2c}{B}$ και ουδεμία πίεση εμφανίζεται .

Πρακτικά το παραπάνω ισχύει μόνο όταν $B \geq \frac{2c}{g}$

Η θεωρία αυτή δίνει τιμές που ανταποκρίνονται στις πραγματικές συνθήκες μόνο για ξηρά, κοκκώδη εδάφη και για μικρά μόνο ύψη . Σε όμοια συμπεράσματα κατέληξαν και τα πειράματα των **Loos και Breth** που για την κάθετη πίεση δίνουν την παρακάτω τιμή .

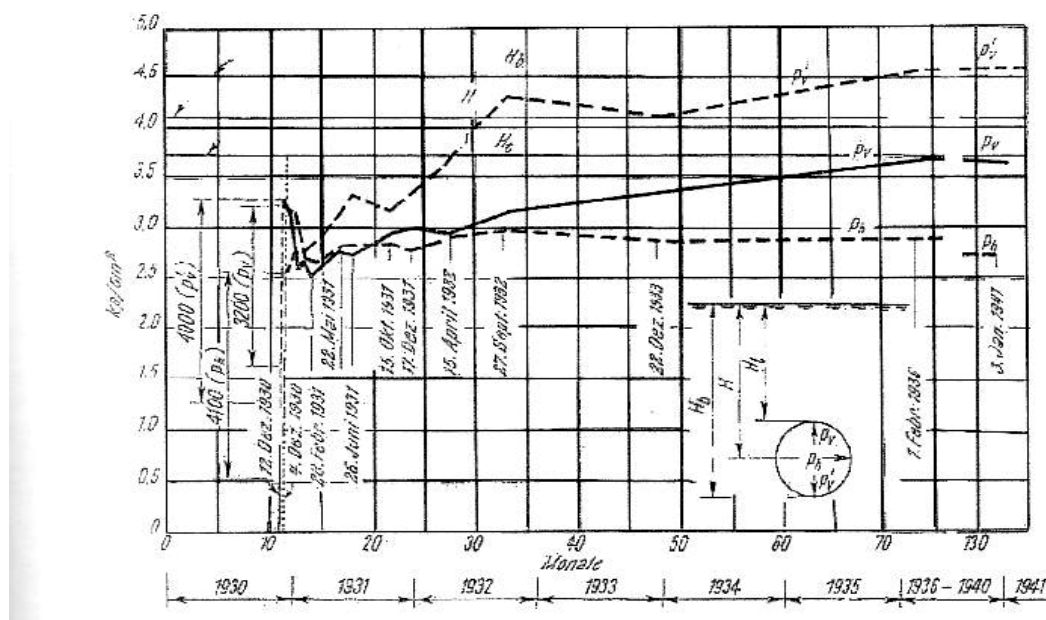
$$p_u = \frac{B * (g - \frac{2c}{B})}{2 * k * \tan b} * (1 - e^{-k * \tan b * \frac{2C}{B}})$$

η οποία διαφέρει από την τελευταία σχέση στο γεγονός ότι έχουμε μία άλλη τιμή σταθερότητας που είναι η **tanβ** άνω του **tanφ** .



Ο **Goldstein** απέδειξε πως η διαρκής σταθερότητα των αργιλωδών εδαφών ανέρχεται μόνο σε **(50-70)%** της τυχαίας σταθερότητας, ότι δηλαδή η τιμή του **z** μειώνεται με τον χρόνο . Επειδή η πίεση σε μερικά εδάφη είναι $p_u = H * (g - \frac{t}{B})$, εξηγείται, από την

διαπίστωση του **Goldstein**, το γεγονός πως η δρώσα πίεση της οροφής σ' ένα σήραγγα, που ανοίγεται σε αργιλώδη εδάφη, αυξάνει βαθμιαία .



Κατά τον υπολογισμό των καθέτων πιέσεων του εδάφους λαμβάνεται υπόψη η ανωτέρω θεωρία του **Terzaghi**, σύμφωνα με την οποία γίνονται οι εξής παραδοχές για τα φορτία .

Όταν το τεχνικό έργο δεν βρίσκεται κάτω από το επίπεδο του υπόγειου νερού, η πίεση του εδάφους για τα διάφορα είδη εδάφους καθορίζεται ως ακολούθως .

- Ø Στον **ογκώδη βράχο** τίθεται ίση με το **0**, όταν η ευστάθεια του δεν κινδυνεύει από διάφορες καταστάσεις .
- Ø Σε **μαλακή άργιλο** ή σε **κοκκώδη εδάφη** τα οποία εκτίθενται σε σημαντικές επιδράσεις, λαμβάνεται ως πίεση της γης, η πλήρης γεωστατική πίεση .
- Ø Σε **ομογενή εδάφη**, η κάθετη φόρτιση παραμένει λόγω της δράσης του θόλου κάτω από την τιμή της γεωστατικής πίεσης .

Ο υπολογισμός των κάθετων φορτίων εξαρτάται και από το υποκείμενο του τεχνικού έργου στρώματος, εάν, δηλαδή πρόκειται περί ενός συνεκτικού ή χαλαρού εδάφους . Ακολούθως χρησιμοποιούνται οι εξής μετρήσεις και χαρακτηρισμοί .

$$B = \frac{b}{2} + m * \tan\left(45 - \frac{\phi}{2}\right)$$

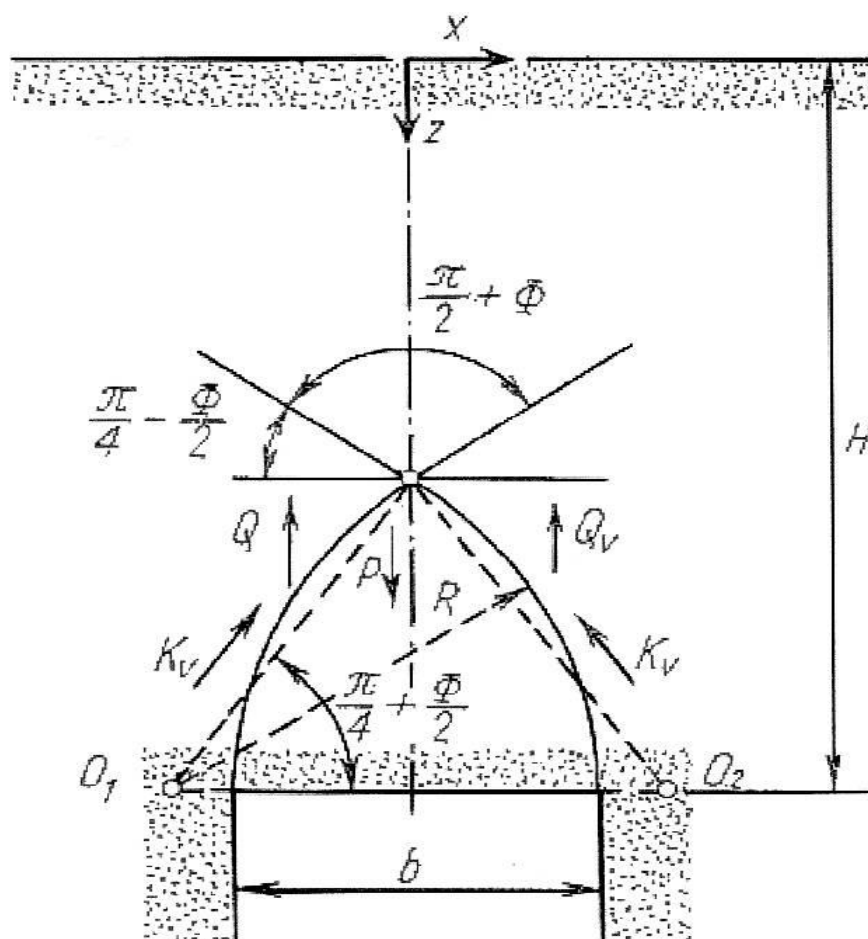
όπου, **b** το εύρος, **m** το ύψος της σήραγγας και ϕ η γωνία εσωτερικής τριβής του παρακείμενου εδάφους .

Εξάλλου, **c** είναι η ελάχιστη τιμή συνοχής των στρωμάτων που βρίσκονται πάνω από το τεχνικό έργο, **c₀** ο συντελεστής συνοχής του άμεσα παρακείμενου στο σήραγγα, εδάφους . Επίσης, **g** είναι η γεωστατική πίεση στο εξεταζόμενο επίπεδο, όπου σε ομογενή εδάφη είναι

$$g = t * \gamma \text{ ενώ σε στρωματωμένα εδάφη ισχύει } \gamma = \sum t_i * \gamma_i .$$

§ 3.3.4. Θεωρία A.Balla

Κατά τον **A.Balla** εμφανίζεται μία χαλάρωση στις εδαφικές μάζες πάνω από τον κενό χώρο, λόγω της διάνοιξης, με τέτοιο τρόπο ώστε αυτές να τείνουν να κινηθούν προς τα κάτω. Λόγω της κίνησης αυτής, η ολίσθηση λαμβάνει χώρα κατά μήκος μιας επιφάνειας ολίσθησης η οποία θεωρείται κύκλοκυλινδρική, διευθυνόμενη από τα πάνω γωνιακά σημεία της οροφής του κενού χώρου, κάθετα προς τα πάνω. Η ημιδιάμετρος του αυτού υπολογίζεται στο ακόλουθο σχήμα.



Βασικές παραδοχές της θεωρίας A.Balla

Η θεωρία του **A.Balla** υπολογίζει την κατανομή των τάσεων επί των επιφανειών ολίσθησης, με βάση την χαρακτηρίζουσα οριακή κατάσταση ισορροπίας (διαφορική εξίσωση του **Kotter**). Έτσι, από την κατάσταση ισορροπίας όλων των κάθετων δυνάμεων που ενεργούν επί την ολισθαίνουσα μάζα προκύπτει ο παρακάτω τύπος .

$$G + Q_u + K_u + P = 0$$

όπου, **Q** = το βάρος των εδαφικών μαζών που περικλείονται από τις επιφάνειες ολίσθησης

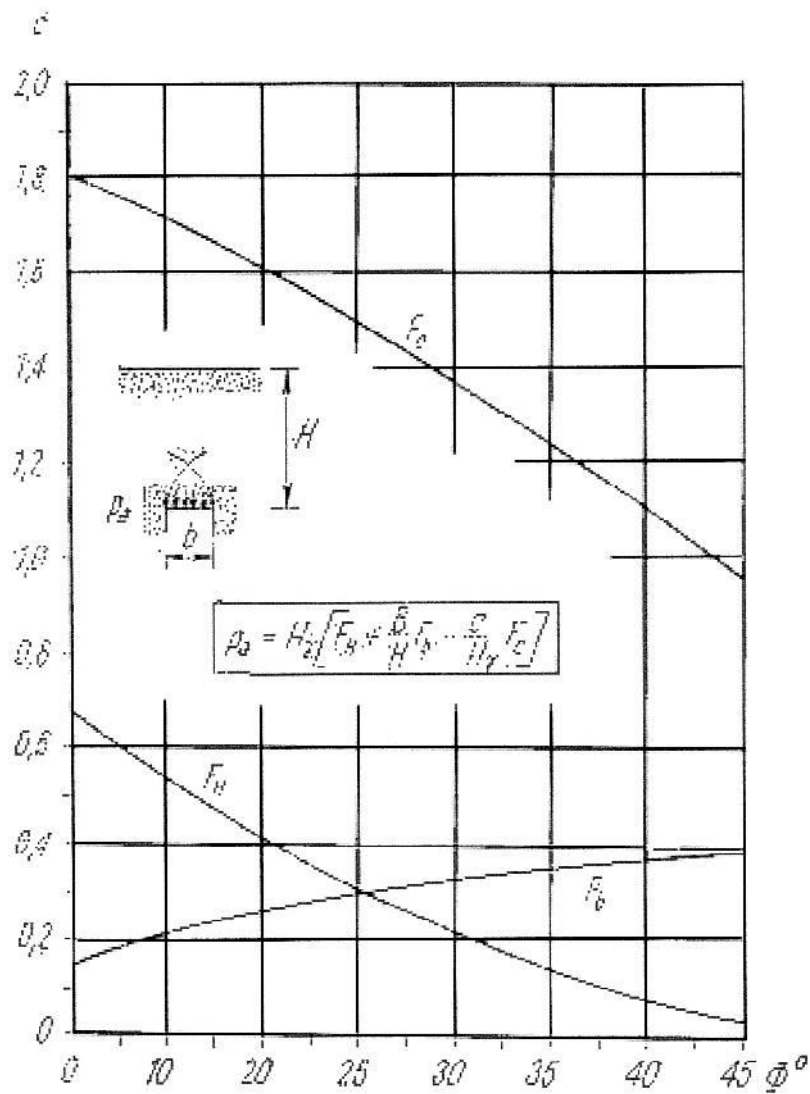
Q_u, K_u = η συνισταμένη των τάσεων επί της επιφανείας ολισθήσεως, λόγω ολισθήσεως και συνοχής αντίστοιχα .

P = η συνισταμένη των πιέσεων του εδάφους μέχρι επί της οροφής του κενού χώρου .

Ο **A.Balla** δίνει την ακόλουθη έκφραση για την πίεση του εδάφους πάνω στην οροφή του κενού χώρου όπου η πίεση αυτή θεωρείται ομοιόμορφα κατανομημένη .

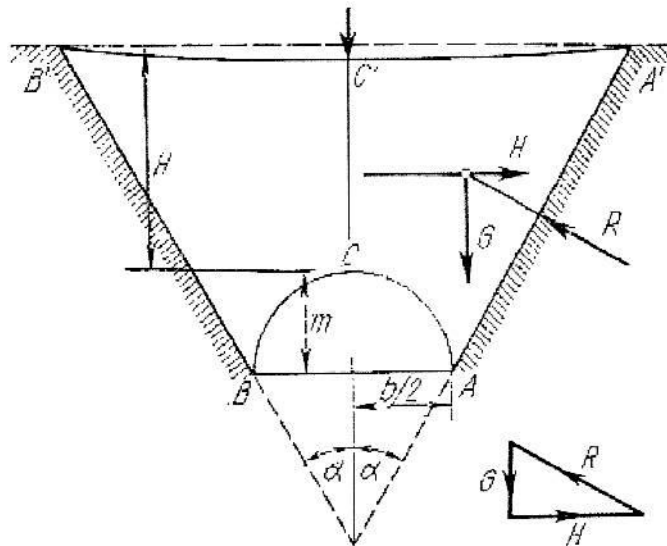
$$P_a = H_g \left(F_H + \frac{b}{H} * F_b - \frac{c}{H_g} * F_c \right)$$

όπου, F_H, F_b, F_c παράμετροι που εξαρτώνται από την γωνία ϕ , γωνία εσωτερικής τριβής του υλικού και λαμβάνονται από τον πίνακα ή από το διάγραμμα του .



§ 3.3.5. Θεωρία Suquet

Η θεωρία ξεκινά από την παραδοχή πως η μάζα $ACBB'A'$ πάνω από τον κενό χώρο, ορίζεται κατά πάσα πιθανότητα από κεκλιμένες επιφάνειες ολίσθησης οι οποίες φθάνουν μέχρι την επιφάνεια, όπως φαίνεται στο κατώτερο σχήμα .



Η μέγιστη τάση επί των εδαφικών μαζών εκφράζεται με την εξής σχέση .

$$s = \frac{2g'}{H} * \left(\frac{\frac{b}{2} * \left(H + \frac{m}{3} \right)}{\tan a} + \frac{(H + m)^3}{2} \right)$$

όπου, γ' = το βάρος του εδάφους .

Η συνολική πίεση δίδεται από την σχέση .

$$p = \frac{2g}{H} * \left(\frac{\frac{b}{2} * H + \frac{m}{3}}{2 * \tan a} + \frac{(H + m)^2}{2} \right)$$

Η τελευταία σχέση απλοποιείται, εάν το ύψος του κενού χώρου (m) θεωρηθεί αμελητέο, αφού σε σύγκριση με το ύψος H είναι πολύ μικρό και γίνεται :

$$p = 2g * \left(\frac{b}{2 * \tan a} + \frac{H}{2} \right)$$

Εάν η πίεση αυτή τεθεί ίση προς την πίεση σταθερότητας του εδάφους σ_a , τότε το φαινόμενο βάρος γ' του εδάφους, υπολογίζεται από την σχέση :

$$g' = \frac{S_d}{2 * \left(\frac{b}{2 * \tan a} + \frac{H}{2} \right)} = \frac{S_d}{\frac{b}{\tan a} + H}$$

Τέλος, το τμήμα της φόρτισης που αντιστοιχεί στον κενό χώρο προκύπτει από την
σχέση $p_o = H * (g - g')$

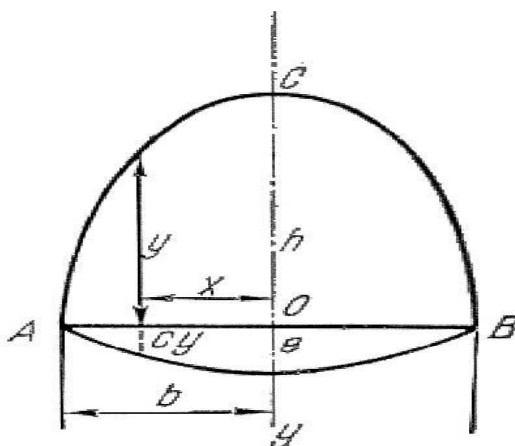
3.4 Θεωρίες υπολογισμού των εδαφικών πιέσεων, βάσει διαφόρων παραδοχών, που δεν λαμβάνουν υπόψη την επίδραση του βάθους

Το σύνολο των θεωριών αυτών ασχολείται βασικά με την θεωρητική αντιμετώπιση της πίεσης χαλάρωσης . Οι θεωρίες αυτές ισχύουν για μέσο βάθος και για πολύ συνεκτικά εδάφη στα οποία η γωνία εσωτερικής τριβής είναι περίπου μηδέν . Σύμφωνα με τις θεωρίες αυτές, στο έδαφος σχηματίζεται ένας θόλος όπου το μέγεθος της πίεσης εξαρτάται από κατά μία άποψη, από τις χαρακτηριστικές τιμές των παραμέτρων, την σταθερότητα και την γωνία εσωτερικής τριβής καθώς επίσης και από τις διαστάσεις του κενού χώρου, ενώ κατά άλλες απόψεις, εξαρτάται από το είδος και τον τρόπο που μεταβάλλεται η κατανομή των τάσεων στην γειτονία του κενού χώρου .

§ 3.4.1. Θεωρία Kommerell

Σύμφωνα με τον **Kommerell**, το ύψος του σώματος πίεσης προσδιορίζεται από την παραμόρφωση που υφίσταται ο κενός χώρος . Παρατηρείται μία καταβύθιση της εδαφικής μάζας, η οποία βρίσκεται σε κίνηση λόγω της παραμόρφωσης . Εξαιτίας αυτής της καταβύθισης δημιουργείται μία χαλάρωση στο έδαφος, με ύψος **h**, αρκετή για να καλύψει την υποχώρηση του εδάφους κατά ύψος **e** . Εάν ο χαρακτηριστικός αριθμός χαλάρωσης είναι δ%, τότε από το $e = \frac{h*d}{100}$ παρακάτω σχήμα προκύπτει η σχέση

και επομένως, $h = \frac{100*e}{d}$.



Για τα διάφορα είδη προτάθηκαν οι ακόλουθες τιμές .

εδάφους

Είδος Εδάφους	Ποσοστό Χαλάρωσης δ%
Χαλαρά, Κοκκώδη	1-3
Μετρίως συνεκτικά	3-5
Συνεκτικά	5-8
Μαλακός βράχος	8-12
Συνεκτικός βράχος	10-15

Για το δ ο **Stini** δίνει τιμές, έπειτα από λεπτομερέστερη διαίρεση των διαφόρων τύπων εδαφών, στον **Πίνακα 3**.

Πάνω από το επίπεδο AB, όπως φαίνεται στο προηγούμενο σχήμα, δρα σώμα πίεσης ύψους h , παραβολικής ή ελλειπτικής διατομής. Εάν θεωρήσουμε ελλειψοειδή διατομή τότε έχουμε την ακόλουθη εξίσωση.

$$\frac{x^2}{\left(\frac{b}{2}\right)^2} + \frac{y^2}{h^2} = 1$$

Επειδή, $h = \frac{100 * e}{d}$ προκύπτει η εξής σχέση: $\frac{4x^2}{b^2} + \frac{y^2 * d^2}{(100 * e)^2} = 1$

Το ολικό φορτίο ανέρχεται σύμφωνα με την εξής σχέση. $p = \frac{p}{2} * g * \frac{b}{2} * h = \frac{p}{2} * g * \frac{100 * e}{d}$

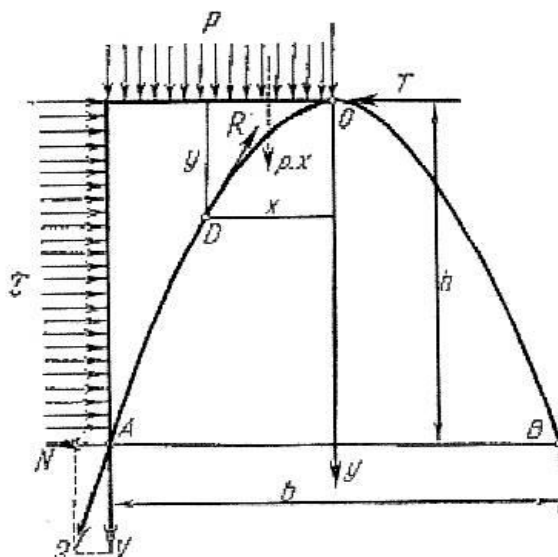
Η θεωρία του **Kommerell**, παρά την ευρεία εφαρμογή της, μόνο σαν προσέγγιση μπορεί να ληφθεί και αυτό λόγω ελλείψεων και υπεραπλουστεύσεων.

Κατά τον **Harosy**, η πίεση του εδάφους η οποία παραδεχόμαστε πως είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη, υπολογίζεται ως ακολούθως.

$$p = \frac{a * g * w_{s3}}{1 - a * g * \left(\frac{1}{C} + h_F\right)}, \text{ με } a = \frac{100}{d} \text{ και } C \text{ σταθερά του εδάφους.}$$

§ 3.4.2. Θεωρία Protodjakonows

Η θεωρία αυτή προσδιορίζει την στερεότητα του φυσικού θόλου, που σχηματίζεται στο έδαφος και που τελευταία εφαρμόζεται πολύ στην πράξη. Στηρίζεται στην παραδοχή πως πάνω από τον κενό χώρο σχηματίζεται ένας θόλος, ο οποίος πρέπει να βρίσκεται σε ισορροπία όταν κατά μήκος του επιπέδου **ABC**, βλέπε στο ακόλουθο σχήμα, εμφανίζονται αποκλειστικά και μόνο τάσεις πίεσεως αλλά όχι ροπές εφελκυσμού.



Βάσει της παραπάνω παραδοχής ο **Protodjakonows** θεώρησε μία παραβολή σαν σχήμα φορτίσεως . Σε ένα τυχαίο τμήμα του τόξου **DO** ενεργούν οι παρακάτω πιέσεις .

- Ø Η οριζόντια συνισταμένη **T** των δυνάμεων του δεξιού ημίσεως του τόξου, που ενεργεί στην κορυφή **O** .
- Ø Η συνισταμένη **P_x** των κάθετων πιέσεων .
- Ø Η εφαπτομενικώς ενεργούσα αντίδραση **R'** των δυνάμεων που ενεργούν στο κατώτερο ήμισυ του θόλου, στο σημείο **D** .

Για το σημείο **D** ισχύει ο μηδενισμός των ροπών, βάσει της ακόλουθης σχέσης .

$$M_m = -Ty + \frac{px^2}{2} = 0 \quad \text{όπου,} \quad \frac{px^2}{2} = T * y .$$

Στο σημείο **A**, την πίεση εξασκεί η συνιστάμενη **R**, που διαχωρίζεται στην οριζόντια συνιστώσα **N** και στην κάθετη συνιστώσα **V** .

Η στερεότητα του φυσικού θόλου προσδιορίζεται από την συνθήκη ότι : « η δράσα αντίσταση, στο επίπεδο *A-B* της κανονικής δύναμης, εξισορροπεί την μετατόπιση που προκαλείται από την οριζόντια δύναμη **N** » δηλαδή, πρέπει **N = v - f** , όπου **v = p * b / 2** και **tanφ** ο παράγοντας εσωτερικής τριβής του εδάφους . Για περισσότερα λαμβάνεται υπόψη και ένας άλλος παράγοντας **th**, οπότε έχουμε :

$$N = p * \frac{b}{2} * f - th$$

Εάν θέσουμε, στην γενική εξίσωση του σημείου **D**, τις οριακές τιμές $x = \frac{b}{2}$, **y=h** και **T=N** τότε προκύπτει η εξής σχέση .

$$t = \left(p * \frac{b^2}{2 * 4} \right) * \left(\frac{4 * f_h - b}{4h^2} \right)$$

Το ύψος του θόλου **h**, προκύπτει από το γεγονός πως η τάση ώθησης θα πρέπει να έχει μια μέγιστη τιμή . Από την πρώτη παράγωγο ως προς **h**, έχουμε :

$$\frac{dz}{dh} = p * \frac{b}{2} = \frac{\frac{b}{2} - fh}{h^3} = 0$$

και προκύπτει ότι :

$$h = \frac{b}{2f} = \frac{b}{2 * \tan f} .$$

Με την παραπάνω τιμή του **h**, έχω ότι $t = \frac{pf^2}{2}$.

Από την οριακή περίπτωση, προκύπτει ότι : $T = N = p * \frac{b}{2} * f - t * h$.

Εάν εισάγω στην οριακή αυτή σχέση, τις πιο πάνω ευρεθείσες τιμές των μεγεθών **h** και **t** τότε προκύπτει η ακόλουθη σχέση .

$$T = p * \frac{b}{2} * f - p * \frac{b * f}{4} = p * \frac{b * f}{4}$$

Έτσι, για την εξίσωση της παραβολής λαμβάνουμε την εξής σχέση .

$$\frac{px^2}{2} = T * y = \frac{p * f * b}{4} * y \quad \text{και} \quad y = \frac{2 * x^2}{b * f}$$

Στον κενό χώρο επιδρά σαν πίεση, το βάρος του εδάφους που περικλείεται από την παραβολή, ενώ το βάρος του εδάφους του ευρισκόμενου εκτός παραβολής, δεν επηρεάζει πλέον τον κενό χώρο . Η επιφάνεια της παραβολής ανέρχεται στην τιμή $F = \frac{2}{3} * b * h$ ενώ έως την μονάδα μήκους ενεργού βάρους στην τιμή

$$P = g * F = \frac{2}{3} * b * h * g$$

Εάν $h = \frac{b}{2 * \tan f}$, τότε προκύπτει ότι : $P = \frac{1}{3} * g * \frac{b}{f}$ και $p_{\max} = \frac{1}{2} * g * \frac{b}{f}$.

Τα πειράματα του **Protodjakonows** απέδειξαν πως οι πιέσεις είναι ανεξάρτητες του βάθους του κενού χώρου . Χρησιμοποιήθηκαν, καταρχήν, κοκκώδη εδάφη αλλά στην συνέχεια, επέκτεινε τους υπολογισμούς τους και σε συνεκτικά εδάφη για τα οποία υπολόγισε διάφορες τιμές του παράγοντα **f** .

Ø Σε **συνεκτικά εδάφη** ισχύει $f = \tan f + \frac{c}{S_d}$.

Ø Σε **βραχώδη εδάφη** ισχύει $f = \frac{S_w}{100}$, με s_w η μονοαξονική αντοχή στην πίεση και s_u η αντοχή του κύβου εδάφους .

Εμπειρικά οι τιμές του **f**, για διάφορα εδάφη αναγράφονται στον Πίνακα12 .

Σύμφωνα με την Σοβιετική πείρα, η θεωρία του **Protodjakonows** έχει καλή εφαρμογή για βάθη $\frac{B}{\tan f} \leq H \leq \frac{b}{\tan f}$, όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα .

Επίσης, η συγκεκριμένη θεωρία, έδωσε καλά αποτελέσματα στους υπολογισμούς των υπόγειων σιδηροδρόμων της Μόσχας και της Βουδαπέστης .Υπάρχουν δε ορισμένα μειονεκτήματα στην θεωρία αυτή, κυρίως, προερχόμενα από τις όχι και τόσο ακριβείς τιμές του παράγοντα **f** του πίνακα αλλά και από την παραδοχή ότι το ύψος και το εύρος του θόλου, βρίσκονται σε γραμμική συσχέτιση, γεγονός το οποίο δεν είναι πάντοτε αληθές.

3.5. Προσδιορισμός Των Πλευρικών Πίεσεων Της Σήραγγας

3.5.1. Προσεγγιστικός προσδιορισμός των πλευρικών πιέσεων

Εκτός από τις κάθετες πιέσεις ή πιέσεις οροφής και οι πλευρικές πιέσεις παίζουν σημαντικό ρόλο στις κατασκευές των υπόγειων έργων. Κατά την γένεση των πλευρικών πιέσεων, οι ιδιότητες του εδάφους, οι διαστάσεις του κενού χώρου και οι γεωλογικά καθορισμένες τάσεις της γης, δύναται να επηρεάσουν σε σημαντικό βαθμό την γενικότερη μελέτη ενός υπόγειου έργου.

Οι πλευρικές πιέσεις, κατά προσέγγιση, προσδιορίζονται ως το γινόμενο της γεωστατικής πίεσης ή της πίεσης της οροφής και του αριθμού γήινης πίεσης, δηλαδή ως συνάρτηση των εγκάρσιων τάσεων.

Κατά τον **Stini**, οι πλευρικές πιέσεις, αντίθετα με τις πιέσεις οροφής, εξαρτώνται γραμμικά από το βάθος του κενού χώρου. Σε μεγαλύτερα βάθη, η πίεση δρα πιο δυναμικά μέσω των ωθήσεων, παρότι η πίεση στην οροφή.

Εμπειρικές τιμές πλευρικών πιέσεων περιέχονται στον **Πίνακα 11**. Από τον πίνακα αυτό, φαίνεται ότι οι πλευρικές πιέσεις ανέρχονται στο $1/4$ έως $1/5$ της πίεσης οροφής. Η σχέση αυτή δύναται, όμως, να μετατοπισθεί από τις γεωλογικές τάσεις τόσο πολύ, που μπορεί να φθάσει ακόμη και στην τιμή **3**.

Ο **Terzaghi** δίνει για την **πλευρική πίεση** τον εξής προσεγγιστικό τύπο.

$$P_h = 0.3 * \gamma * (0.5 * m + h_p)$$

όπου, h_p = το ύψος του πυρήνα χαλάρωσης του εδάφους.

Για **κοικώδη εδάφη**, δίνει βάσει της κατάστασης **Rankine**, τον παρακάτω τύπο.

$$p_h = g * H * \tan\left(45 - \frac{j}{2}\right)$$

Για **συνεκτικά πετρώματα**,

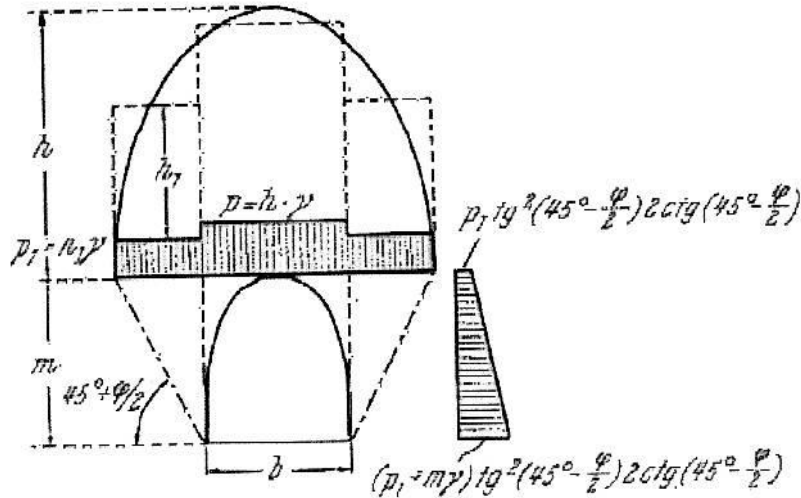
e_h αναίρειται πλήρως, δίνει την ακόλουθη

$$E_h = \frac{1}{E} [p_h - m(p_u + p_h)] = 0$$

όπου,

$$p_h = \frac{m}{1 - m} * p_u$$

Σύμφωνα με την **Σοβιετική εμπειρία**, η πλευρική πίεση θεωρείται σαν ένα τραπεζοειδές κατανεμημένο φορτίο και προσδιορίζεται, όχι από την γεωστατική πίεση αλλά από μια κάθετη πίεση, η οποία προκύπτει από την εφαρμογή μίας θεωρίας προσδιορισμού της πίεσης του εδάφους.



Συνήθης παραδοχή της δρώσας πίεσης του εδάφους της σήραγγας

Έτσι, η ολική πλευρική πίεση, στο ύψος της οροφής προκύπτει βάσει της εξής σχέσης .

$$e_1 = p_2 \tan^2 \left(45 - \frac{j}{2} \right) - 2c \tan \left(45 - \frac{j}{2} \right)$$

Αντιθέτως, η ολική πλευρική πίεση, στο ύψος του θεμελίου δίδεται από τον παρακάτω τύπο .

$$e_2 = (p_2 + m_g) \tan^2 \left(45 - \frac{j}{2} \right) - 2c \tan \left(45 - \frac{j}{2} \right)$$

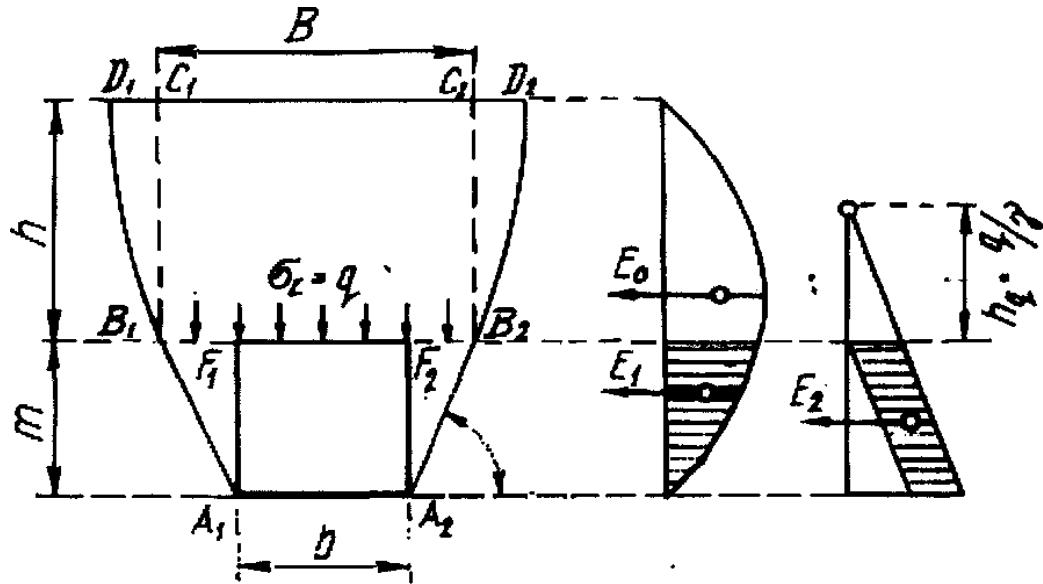
Ο **Engesser** προσδιορίζει την πλευρική πίεση, με τον πολλαπλασιασμό της πίεσης οροφής με τον παράγοντα **Rankine** .

Κατά τον **Protodjakonows**, η πλευρική πίεση του κενού χώρου, ύψους **m** έχει το ακόλουθο μέγεθος .

Στους φαίνονται οι πίεσης $\lambda = \mu / 2$), όπου από τους παραπάνω τύπους αριθμοί πλευρικής $1 - \mu$ ή $\lambda = \tan^2 * (45 - \varphi / 2)$, προέκυψε πως η τιμή λ δεν εξαρτάται μόνο από τον αριθμό **Poisson** αλλά και από τις γεωμορφολογικές συνθήκες, γεγονός το οποίο εξηγεί τις αξιόλογες διαφορές στις τιμές αυτών . Ο **Terzaghi** προτείνει σε μία δεδομένη περίπτωση να αναφέρονται, όχι συγκεκριμένες τιμές του λ αλλά πεδία αυτών μεταξύ ορισμένων ορίων .

Κατά τους **Loos και Breth** γίνεται παραδεκτό πως η πλευρική πίεση κατανέμεται όχι τριγωνικά αλλά παραβολικά επί του ύψους μεταξύ επιφάνειας του εδάφους και του θεμελίου του κενού χώρου . Εδώ, η **συνισταμένη πλευρική πίεση E_o** παραμένει ίση προς εκείνη που προκύπτει από την γραμμική αύξηση . Εάν **A1-P1** και **A2-P2** επιφάνειες ολίσθησης, τότε προκύπτει η συνισταμένη δύναμη E_o , η οποία ενεργεί στο μέσο της απόστασης **A₂,C₂**, ως εξής :

$$E_o = I_a * g * \frac{(h+m)^2}{2}$$



Προσδιορι

σμός οριζόντιων πιέσεων κατά *Loos και Breth*

Η δε ολική πλευρική πίεση E δίνεται ως $E = E_1 + E_2$, όπου η E_1 θεωρείται σαν εύρος της πίεσης E_0 και είναι $E_1 = E_0 / n$.

Κατά την θεωρία **Coulomb**, προκύπτει για το τμήμα E_2 της πίεσης η σχέση.

$$E_1 = \frac{E_0}{n}$$

$$E_2 = \frac{1}{2} I_a * g * (h_m + m)^2 - \frac{1}{2} I_a * g * (h_m^2 + m^2) = I_a * g * h_q * m$$

3.5.2. Ακριβέστερος προσδιορισμός των πλευρικών πιέσεων, μέσω πρότυπων πειραμάτων και μετρήσεων, στα ήδη κατασκευασθέντα υπόγεια έργα

Ένας τέτοιος προσδιορισμός λαμβάνει υπόψη, εκτός από τις ενεργές δυνάμεις και τις τάσεις του εδάφους από γεωλογικά αίτια και την παθητική αντίσταση του εδάφους. Πειράματα και μετρήσεις στην Ελβετία, απέδειξαν πως, εάν οι τοπικές συνθήκες δεν επιτρέπουν επαρκή μετατόπιση και χαλάρωση των γύρω εδαφικών μαζών, τότε οι οριζόντιες πιέσεις εξαρτώνται περισσότερο από τις γεωστατικές παρά από τις υπολογιζόμενες κάθετες πιέσεις του εδάφους. Έτσι, κατά **Bonnard**, προκύπτει ότι η σχέση

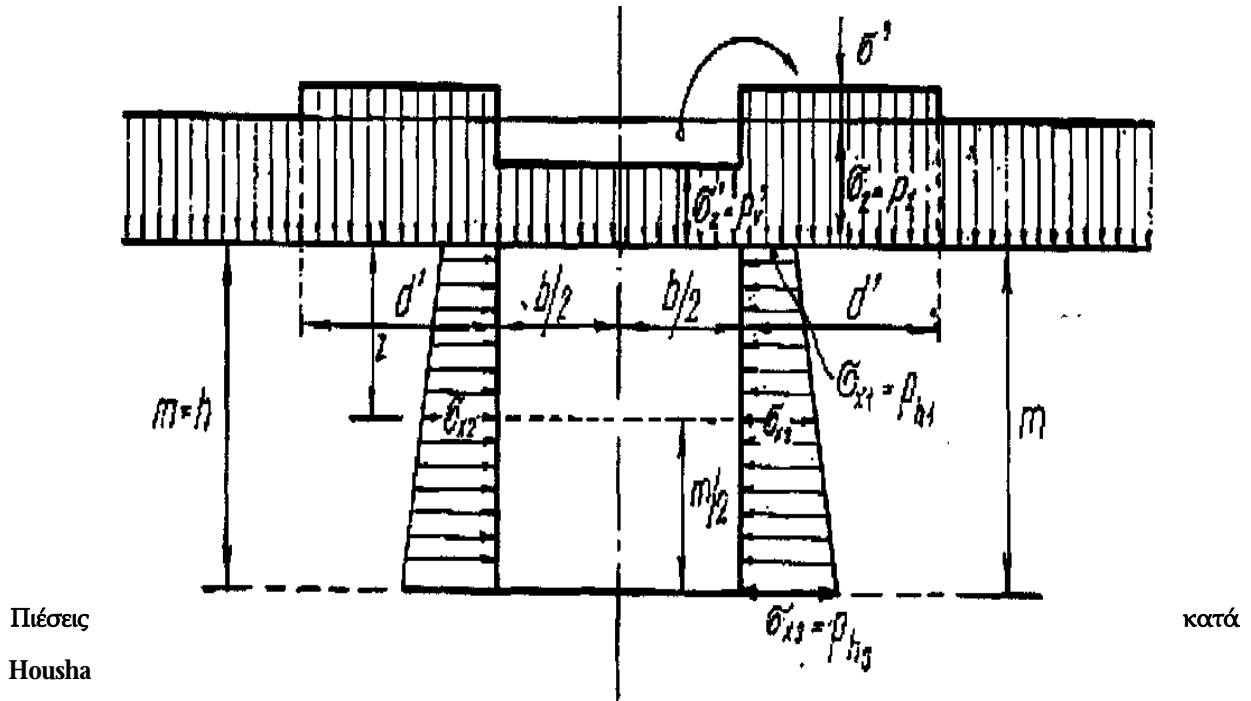
$$P_h = I_a * g * H - 2c\sqrt{I_a}$$

όπου, H το ύψος από τον κενό χώρο

μέχρι την επιφάνεια του εδάφους.

Ο **Housha** προτείνει, λόγω των περιορισμένων δυνατοτήτων μετατόπισης, να λάβουμε μειωμένες τιμές $\varphi' = 2/3 * \varphi$ και $c' = 2/3 * c$. Έτσι, προκύπτουν κάθετες πιέσεις του εδάφους p_u κάπως μεγαλύτερες, οι οποίες

προσδιορίζονται κατά **Terzaghi** .



Πρέπει εδώ, να παρατηρηθεί πως ένα ορισμένο τμήμα των κάθετων φορτίων πέφτει στις πλευρικές πιέσεις . Το φορτίο αυτό προσδιορίζεται από τον ακόλουθο τύπο .

$$P_h = (H * g - P_u') * \frac{b}{d'}$$

Το ανώτερο φορτίο ενεργοποιείται στο επίπεδο της οροφής και κατανέμεται ομοιόμορφα επί ενός εύρους d' και το οποίο προσδιορίζεται από την παρακάτω σχέση .

$$d' = \sqrt{I_a} \frac{m}{2} + H \tan' j'$$

Έτσι, λαμβάνουμε την **οριζόντια πίεση** σε ένα οποιοδήποτε βάθος z κάτω από την οροφή, ως εξής .

$$s_c = [g * (H + z) + s'] * I_a' - 2 * c \sqrt{I_a}$$

Οι λαμβανόμενες, κατά την μέθοδο **Housha**, τιμές των κάθετων p_u' και οριζόντιων p_h ανταποκρίνονται περισσότερο στην πραγματικότητα, όμως, οι υπολογιζόμενες τιμές με την βοήθεια των σχέσεων

$$e_1 = p_2 \tan^2 \left(45 - \frac{j}{2} \right) - 2c \tan \left(45 - \frac{j}{2} \right)$$

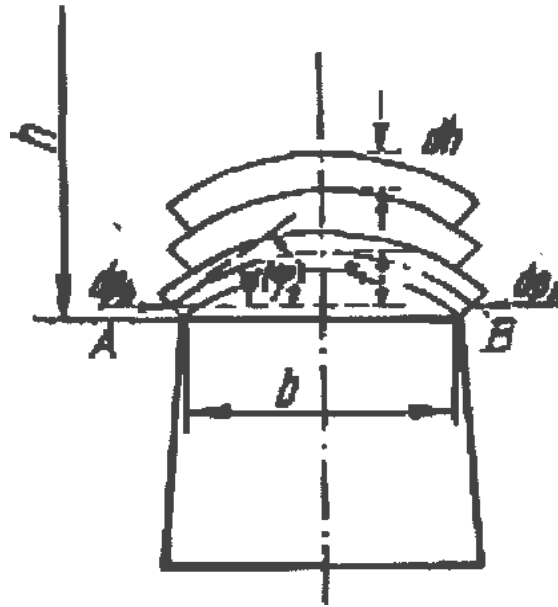
$$e_2 = (p_2 + m_g) \tan^2 \left(45 - \frac{j}{2} \right) - 2c \tan \left(45 - \frac{j}{2} \right)$$

υπερεκτιμώνται κατά **10 - 15%** και **70-150%** αντιστοίχως .

3.5.3. Υπολογισμός των πλευρικών πιέσεων κατά **Engesser**

Η μέθοδος υπολογισμού των πλευρικών πιέσεων στα υπόγεια έργα, κατά **Engesser**, στηρίζεται στην παραδοχή του σχηματισμού ενός θόλου και μάλιστα μιας σειράς επαλλήλων θόλων . Η θεωρία του, επίσης,

Ξεκινά από την παραδοχή της ύπαρξης μιας, όχι συνεκτικής μάζας πετρώματος, άπειρης έκτασης και οριζόντιας επιφάνειας .



Για τον ειδικής πίεσης, ο πως αυτή των επάλληλων θόλων σχηματίζουν με την οριζόντιο μια γωνία γ , η οποία ισούται καταρχήν με την γωνία φ της εσωτερικής τριβής του εδάφους . Έτσι, με ύψος βέλους $f = b/2 * \tan \varphi$ λαμβάνει την οριζόντια ώθηση ενός στοιχείου του θόλου, η οποία θεωρείται σαν ένα τριαρθρωτό τόξο, βάσει της σχέσης :

προσδιορισμό της ελάχιστης Engesser παραδέχεται, αυθαίρετα, λαμβάνεται όταν οι εφαπτόμενες

$$dp_h = \frac{b^2 * d * q}{2 * f} = \frac{b^2 *}{2 * f} * \left(g - \frac{p}{h}\right) * dh = \frac{b}{\tan f} * \left(g - \frac{q}{h}\right) * dh$$

Η κάθετη αντίσταση προκύπτει βάσει της ακόλουθης σχέσης .

$$p = I_a * d * p_h = \frac{b}{\tan(f)} \left(g - \frac{p}{h}\right) \tan^2 \left(45 - \frac{j}{2}\right)$$

$$p_{\min} = \left[\frac{h * b * \tan^2 \left(45 - \frac{j}{2}\right)}{2h * \tan j + b \tan^2 \left(45 - \frac{j}{2}\right)} \right] + b \frac{b * \tan j}{6} * 2g$$

Η ολική πίεση επί του επίπεδου AB, όπως φαίνεται στο ανώτερο σχήμα, συμπεριλαμβανομένου και του βάρους της δρώσας μάζας που εφαρμόζεται άμεσα στην οροφή, γράφεται ως ακολούθως .

$$p_{\min} = 4b^2 g \left[\frac{h * \tan^2 \left(45 - \frac{j}{2}\right)}{2h * \tan j + b \tan^2 \left(45 - \frac{j}{2}\right)} + \frac{\tan j}{6} \right]$$

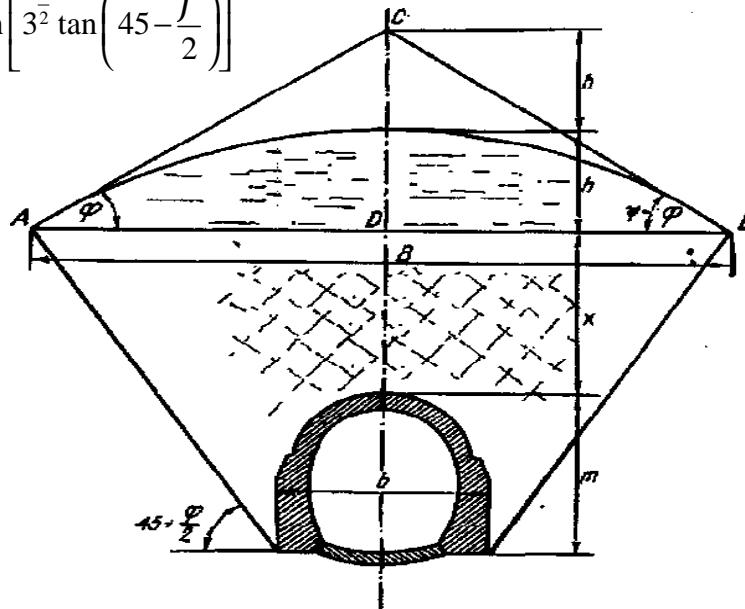
Ειδικά, δε, όταν πρόκειται για μεγάλα βάθη και για μη πολύ μικρές τιμές γωνίας εσωτερικής τριβής, η ολική πίεση υπολογίζεται ως ακολούθως .

$$p_{\min} = 4b^2 \left[\tan^2 \left(45 - \frac{j}{2}\right) \frac{\cot j}{2} + \frac{\tan j}{6} \right]$$

Κατά την τελευταία σχέση προκύπτει ότι η πίεση επί την οροφή του κενού χώρου είναι ανεξάρτητη του ύψους του εδάφους πάνω από τον κενό χώρο .

Εάν, για να λάβουμε την αρχική γωνία, παραδεχθούμε την άποψη του **Bierbanker**, δηλαδή ότι η πίεση επί της οροφής της σήραγγας γίνεται ελάχιστη, τότε προκύπτει η εξής σχέση .

$$y = \arctan \left[3^{\frac{1}{2}} \tan \left(45 - \frac{j}{2} \right) \right]$$



Το βάρος της εδάφους μεταξύ του θόλου και της οροφής μεταβάλλεται και την ακόλουθη τιμή .

μάζας του κατώτατου της σήραγγας μπορεί να λάβει

$$\frac{2 * b^2 * g}{\sqrt{3}} * \tan f \left(45 - \frac{f}{2} \right)$$

Συνεπώς, η **ολική πίεση στην οροφή** της σήραγγας υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση .

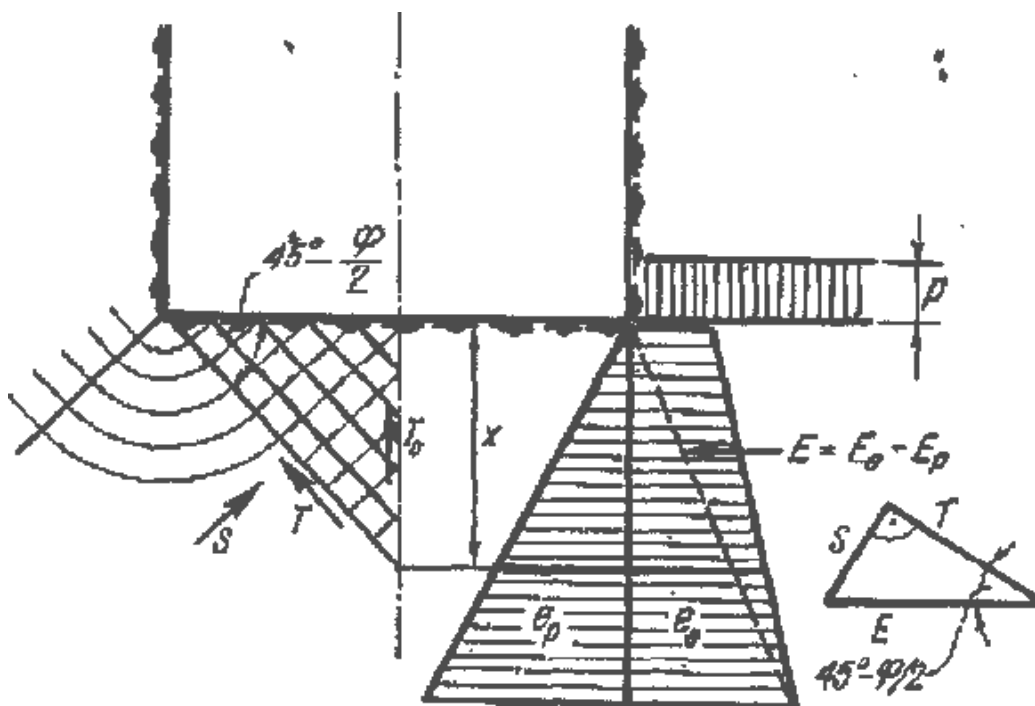
$$p_{\min} = \frac{2b^2g}{\sqrt{3}} * \tan \left(45 - \frac{j}{2} \right)$$

Ο **Engesser** ανέπτυξε την θεωρία του, πειραματιζόμενος με άμμο . Καλή εφαρμογή της θεωρίας του γίνεται όταν $h \geq 1.56$. Οι αντιρρήσεις εναντίον της θεωρίας αυτής, έγκειται στο γεγονός πως ο σχηματισμός θόλου σε διάφορα επίπεδα εντός του υπερκείμενου του κενού θόλου, ύψους του εδάφους, δεν δύναται να εμφανισθεί αλλά παραμένει περιορισμένος σε ένα ορισμένο ύψος, όχι πολύ ψηλά, αλλά βρισκόμενος εντός του εδάφους . Στην υποσημείωση λαμβάνεται υπόψη η προκαλούμενη, από τις εργασίες ανατίναξης χαλάρωση του εδάφους . Σ' αυτές τις περιπτώσεις, για τους υπολογισμούς, δεν λαμβάνεται το εύρος **b** του σήραγγα αλλά το εύρος **B** του εδάφους δηλαδή το χαλαρωμένο πλάτος, από τις εργασίες ανατίναξης .

3.6. Προσδιορισμός Των Πιέσεων Επί Των Θεμελίων Της Σήραγγας

3.6.1. Υπολογισμός των πιέσεων επί των θεμελίων κατά Zimburjewitsch

Οι πιέσεις που εμφανίζονται στο δάπεδο του κενού χώρου της σήραγγας, φαίνονται διαγραμματικά στο ακόλουθο σχήμα .



Η πίεση σε βάθος x (ενεργητικές πιέσεις), υπολογίζεται με την βοήθεια του τραπέζιου του παραπάνω σχήματος, από την εξής σχέση .

$$e_a = (p + x * g) \tan^2 \left(45 - \frac{j}{2} \right) - 2c \tan \left(45 - \frac{j}{2} \right)$$

Η τιμή της παθητικής πίεσης σε βάθος x , υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο .

$$e_p = x * g \tan^2 \left(45 - \frac{k}{2} \right) + 2c \tan \left(45 - \frac{j}{2} \right)$$

Το βάθος x , στο οποίο ισχύει $e_a = e_p$ δίνεται από τον παρακάτω τύπο .

$$x = \frac{p * \tan^2 \left(45 - \frac{j}{2} \right) - 2c \left[\tan \left(45 - \frac{j}{2} \right) + \tan \left(45 - \frac{j}{2} \right) \right]}{g * \left[\tan^2 \left(45 - \frac{j}{2} \right) - \tan^2 \left(45 - \frac{j}{2} \right) \right]} = \frac{p * I_a - 2c (\sqrt{I_p} + \sqrt{I_a})}{g * (I_p - I_a)}$$

Επομένως, για την διαμόρφωση της πίεσης των θεμελίων συμμετέχουν όλα τα στρώματα του εδάφους, τα οποία βρίσκονται πάνω από το βάθος x .

Το μέγεθος της δρώσας οριζόντιας δύναμης, πάνω από το συγκεκριμένο βάθος έως τον κενό χώρο, είναι ίσο προς την διαφορά μεταξύ των επιφανειών τάσεων e_a και e_p . Υπό την επίδραση της δύναμης αυτής, σχηματίζεται μία ομάδα γραμμών ολίσθησης στην μάζα κάτω από τον κενό χώρο, οι οποίες τέμνουν την οριζόντιο υπό γωνία 45° έως και $\varphi/2$.

Η συνισταμένη δύναμη $E = E_a - E_p$, αναλύεται σε δύο συνιστώσες, μία παράλληλη στην ομάδα γραμμών ολίσθησης T και μία κάθετη στην προηγούμενη S .

$$T = E \cos \left(45 - \frac{j}{2} \right)$$

$$S = E \sin \left(45 - \frac{j}{2} \right)$$

Η δύναμη T τείνει να μετατοπίσει το έδαφος από την θέση του καθώς στην δύναμη αυτή αντιδρά η συνιστώσα τριβής της κανονικής δύναμης, όπου η τελευταία προκύπτει από την σχέση . $T = S \cdot \tan \varphi$

Επειδή το έδαφος υπό την επίδραση μιας αμφίπλευρης δύναμης τίθεται σε κίνηση, μπορεί να γραφτεί, μετά από τριγωνομετρικούς υπολογισμούς, για τις δυνάμεις που δρουν στην επιφάνεια των θεμελίων της σήραγγας ως ακολούθως .

$$T_s = 2E \frac{\sin^2\left(45 - \frac{j}{2}\right)}{\cos j}$$

Η καθέτως διευθυνόμενη συνισταμένη T_0 , ενεργεί στην μεσαία γραμμή . Αυτή, η προς τα άνω δρώσα πίεση, δύναται να εξισορροπηθεί από ένα αντίθετο φορτίο q_0 , των θεμελίων ή με την βοήθεια ενός αντίθετου θόλου .

Η φόρτιση αυτή, η q_0 , ενεργεί μέσα σε ένα μήκος y , το οποίο υπολογίζεται από την σχέση:

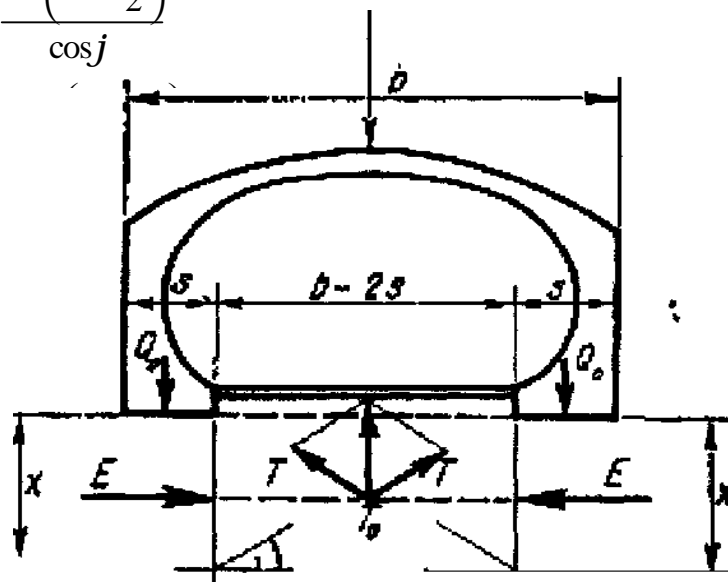
$$y = \frac{x}{\tan\left(45 - \frac{f}{2}\right)}$$

Στην περίπτωση ενός κοκκώδους εδάφους, η πίεση θεμελίων στον κενό χώρο υπολογίζεται όπως περιγράφεται παρακάτω . Εάν $q = Q_0 / s$, (ακόλουθο σχήμα), η αντίδραση του θεμελίου και $H = q / \gamma$ το ύψος της στέψης του εδάφους που βρίσκεται στον κενό χώρο της σήραγγας τότε προκύπτει ότι :

$$x = H \frac{\tan^2\left(45 - \frac{j}{2}\right)}{\tan^2\left(45 + \frac{j}{2}\right) - \tan^2\left(45 - \frac{j}{2}\right)}$$

$$E = E_a - E_p = \frac{1}{2} g x (x + 2H) \tan^2\left(45 - \frac{j}{2}\right) - \frac{1}{2} g x^2 \tan^2\left(45 + \frac{j}{2}\right)$$

$$T = E \frac{\sin\left(45 - \frac{j}{2}\right)}{\cos j}$$



Υπολογισμός των

πίεσεων κατά Dawidow

Η εκ των κάτω επί του κενού χώρου δρώσα πίεση γράφεται ως ακολούθως .

$$T_o = 2 * T * \sin\left(45 - \frac{f}{2}\right)$$

Αυτή η πίεση, μπορεί να εξισορροπηθεί μέσω της τοποθέτησης πλακών ή την φόρτιση στο εσωτερικό του θόλου της σήραγγας καθώς υπολογίζεται με συντελεστή ασφαλείας **1.3** έως **1.5**.

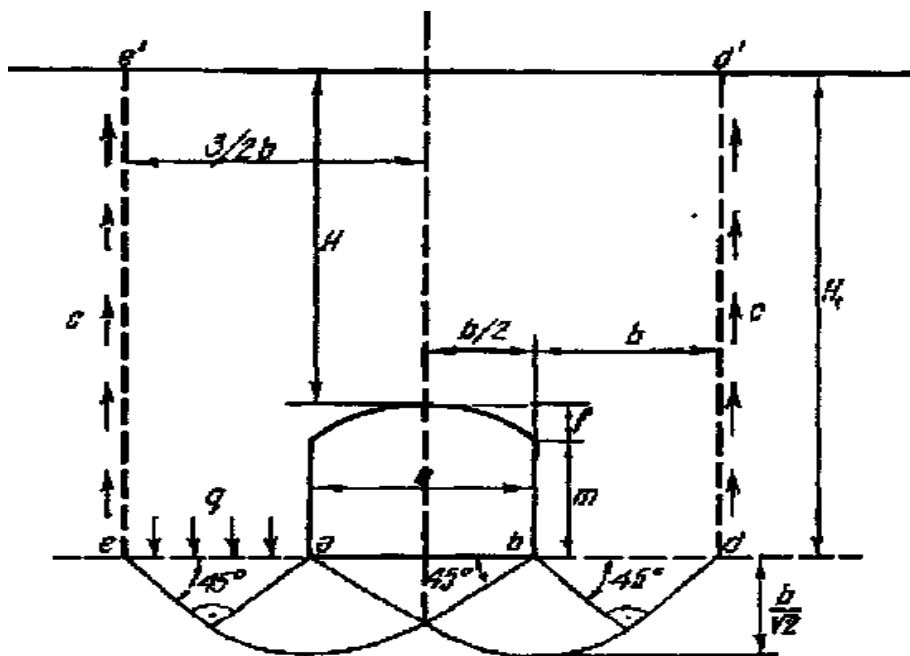
Εάν $b/2 - s$ το ενεργό εύρος φόρτισης, P_{pl} το βάρος της πλάκας και $P_{eswt. fort.}$ το βάρος της εσωτερικής φόρτισης, ο συντελεστής ασφαλείας θα ληφθεί από την σύγκριση της εμφανιζόμενης προς τα κάτω τάσης και της προς τα άνω δρώσας τάσεως και ο οποίος προκύπτει από την εξής σχέση .

$$n = \frac{P_{pl} + P_{eswt. fort.}}{T_o} * \left[\frac{y}{\left(\frac{b}{2} - S\right)} \right] \geq 1.3 - 1.5$$

3.6.2. Υπολογισμός των πιέσεων επί των θεμελίων κατά Terzaghi

Κατά τον **Terzaghi**, η πίεση των θεμελίων, με χονδρική εκτίμηση, φθάνει στο μισό ενώ η πλευρική πίεση φθάνει στο μισό της πίεσης οροφής . Και εδώ, μπορεί να εμφανιστούν δύο οριακές περιπτώσεις . Η μία αντιστοιχεί στα εντελώς συνεκτικά εδάφη για τα οποία ισχύει $c=0$ και $\varphi=0$ και η άλλη στα ψαθυρά εδάφη όπου $c=0$ και $\varphi \neq 0$.

Αρχικά, θα εξεταστεί η περίπτωση κατά την οποία, γύρω από την σήραγγα, έχουμε ένα έδαφος με ειδικό βάρος γ , συνεκτικότητας c και με γωνία εσωτερικής τριβής $\varphi=0$.



Υπολογισμός της πίεσης των θεμελίων κατά Terzaghi

Τα έδαφος πάνω από τις επιφάνειες των θεμελίων που διχοτομούν τις πλευρές **ea** και **bd**, μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα φορτίο το οποίο δρα από εξωτερικά . Το πρόβλημα είναι, λοιπόν, να προσδιορισθεί η κατάσταση ισορροπίας του εδάφους . Το μέγεθος των δυνάμεων που ενεργούν στην επιφάνεια **ae** και οι οποίες δεν πρέπει να υπερβαίνουν την αντοχή του εδάφους σε θραύση, δίνεται από τον παρακάτω τύπο .

Έναντι της δύναμης αυτής ανέρχεται η φέρουσα ικανότητα της λωρίδας του εδάφους εύρους $ae=b$, σύμφωνα με την εξής σχέση .

$$Q_o = \left(b + \frac{b}{2} \right) H_1 g - m \frac{b}{2} g = \frac{1}{3} b f g - H_1 c = \frac{b g}{2} \left(3 H_1 - m - \frac{2}{3} f \right) - H_1 c$$

$$Q - p_{\max} * b = (2 + p) c * b$$

Ο δε **συντελεστής ασφαλείας** εκφράζεται μέσω του παρακάτω πηλίκου .

$$n = \frac{Q}{Q_o} = \frac{(2 + p) 2c * b}{b * g \left[\left(3H_1 - m - \frac{2}{3} f \right) - 2 \frac{H_1 c}{bg} \right]} = \frac{2c(2 + p)}{g \left[H_1 \left(3 - \frac{2c}{b * g} \right) - m - \frac{2}{3} f \right]}$$

Για

να έχουμε μία επαρκή ασφάλεια έναντι της, προς το εσωτερικό του κενού χώρου, ολίσθησης του εδάφους θα πρέπει η τιμή του συντελεστή ασφαλείας να τεθεί ίση τουλάχιστον με **1.3** έως **1.5** .

Πάνω σε αυτήν την θεωρητική βάση, εξετάζει ο **Terzaghi** την περίπτωση των εδαφών με $c=0$ και $\varphi \neq 0$. Έστω, A το εύρος **ae** το οποίο εξαρτάται από την τιμή της γωνίας φ της εσωτερικής τριβής του εδάφους . Η αντίσταση που ενεργεί στην καθέτως υποτιθέμενη επιφάνεια ολίσθησης, προκύπτει σαν γινόμενο της κανονικής δύναμης (ενεργή πίεση του εδάφους) και της ειδικής τριβής **tanφ** .

Οι επενεργούσες δυνάμεις υπολογίζονται ως ακολούθως .

$$Q_o = \left(A + \frac{b}{2} \right) H_1 g - m \frac{b}{2} g - \frac{2}{3} * \frac{b}{2} f g - \frac{1}{2} g H_1^2 \tan^2 \left(45 - \frac{j}{2} \right) * \tan j$$

$$Q_o = g H_1 A Q$$

$$Q_1 = \frac{1}{2} g H_1 \tan^2 \left(45 - \frac{j}{2} \right) * \tan j - \frac{b}{2} g \left(H_1 - m - \frac{2}{3} f \right)$$

Το **φορτίο θραύσεως**, το οποίο εκφράζει την ικανότητα φόρτισης του εδάφους, μπορεί να ληφθεί για την περίπτωση $c=0$ από την εξής σχέση .

$$Q = A^2 * \gamma * \eta_o$$

όπου η_o είναι ένας χαρακτηριστικός αριθμός για την αντίσταση του εδάφους στην ολίσθηση και ο οποίος λαμβάνει τις ακόλουθες τιμές συναρτήσει του φ .

φ	0	10	20	25	30	35	40	44	48
ηο	0	1	5	10	20	40	140	260	780

Το πηλίκο $\eta = Q / Q_o$ εκφράζει την ασφάλεια έναντι ολίσθησης .

Το δε ελάχιστο εύρος του A , λαμβάνεται από τη συνθήκη $dh/dA = 0$, όπου πρέπει να ισχύει :

$$\frac{d}{dA} = \left(\frac{g n_o A^2}{g H_1 A - Q} \right) = 0$$

Έτσι,

λαμβάνουμε

$/ \gamma * H_1$.

$$\frac{(g H_1 A - Q_1) 2g n_o A - g n_o A^2 g H_1}{(g H_1 A - Q_1)^2}$$

$$A = Q_1$$

Αντικαθιστώντας την τιμή του Q_1 , που βρήκαμε παραπάνω, λαμβάνουμε το ελάχιστο A όπου πρέπει:

$$A = H_1 \tan j \tan^2 \left[45 - \frac{j}{2} - \frac{b}{2} \left(H_1 - m - \frac{2}{3} f \right) \right] \geq 0$$

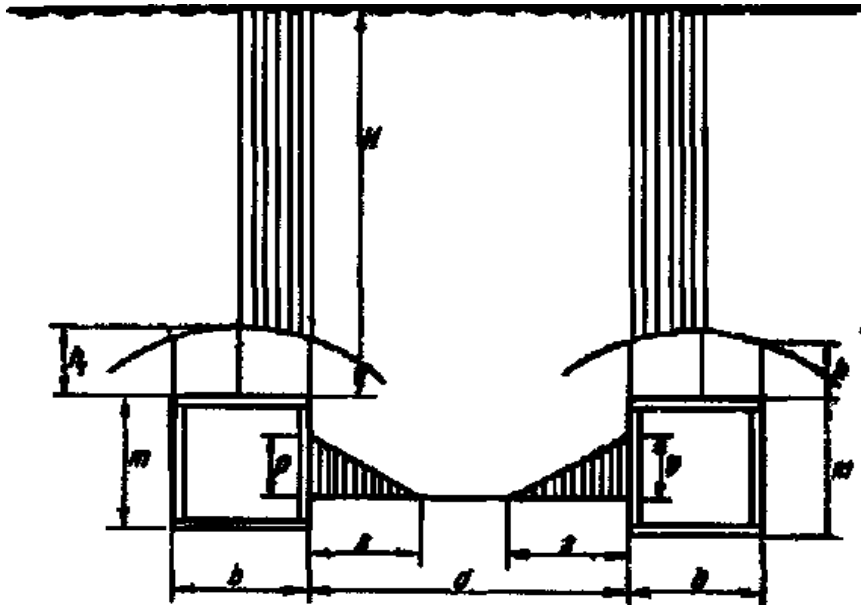
Η τιμή του A

δύναται να

αυξηθεί αναλόγως με τον επιθυμητό συντελεστή ασφαλείας ο οποίος δύναται να λάβει τιμές από **1.3** έως **1.5** .

3.6.3. Υπολογισμός των πιέσεων επί των θεμελίων κατά Protodjakonows

Η επί των στύλων αντιστοιχούσα, επιπλέον, φόρτιση προκύπτει από το βάρος της μάζας του εδάφους, το οποίο βρίσκεται μεταξύ του θόλου του κενού χώρου της σήραγγας και της επιφάνειας του εδάφους (γραμμωτό τμήμα).



Το βάρος της μάζας του εδάφους κάτω από τον θόλο φέρεται από τα τοιχώματα του σήραγγα. Παραδεχόμαστε πως η επιπλέον φόρτιση στην κάθετη τομή των στύλων, κατανέμεται τριγωνικά μέχρι την βασική γραμμή S , η οποία ελαττώνεται από τον κενό

χώρο προς το εσωτερικό του στύλου.

$$\frac{Hb}{2}g \left[h' \frac{b}{2}g + \frac{2}{3} * \frac{b}{2} (h_1 - h')g \right] - \frac{1}{2} p s$$

Η συνθήκη ισορροπίας του γράφεται ως εξής .

Εάν, για λόγους ασφάλειας, θεωρήσουμε την έκφραση στην παρένθεση αμελητέα τότε προκύπτει η σχέση .

$$\frac{H*b}{2} * g - \frac{p*s}{2} = 0$$

Ο Protodjakonows έλαβε πειραματικά από την κορυφή των πιέσεων p και από το μήκος διανομής S , την παρακάτω σχέση .

$$\frac{p}{s} = 0.0745 f me \frac{Hb}{2} g - \frac{0.0745 * fs^2}{2} = 0$$

$$s = 5.2 \sqrt{\frac{gbf}{2f}}$$

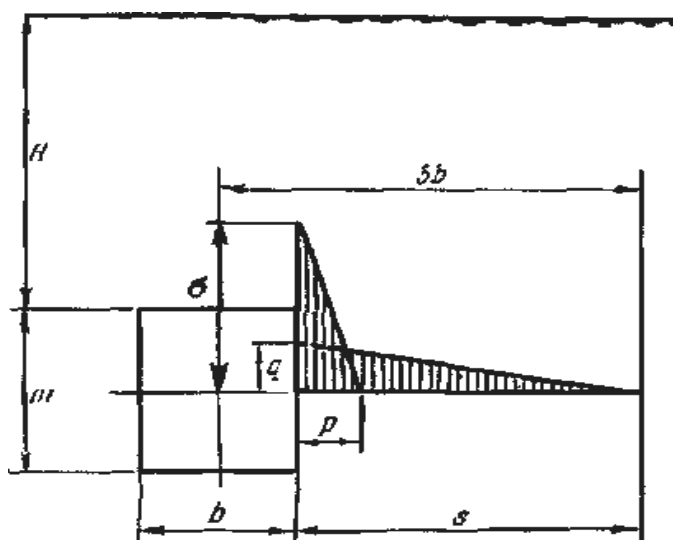
Ο στύλος πρέπει, επομένως, να έχει τουλάχιστον εύρος $2S$. Έτσι, με τον παράγοντα ασφάλειας (n) λαμβάνουμε την ελάχιστη απόσταση των γειτονικών κενών χώρων ως εξής .

$$d(cm) = \sqrt{\frac{gbf}{2f}}$$

όπου, f η τιμή της αντοχής του εδάφους κατά **Protodjakonows** καθώς και οι τιμές που προκύπτουν από την παραπάνω σχέση είναι σε **kg** και **cm**.

3.6.4. Υπολογισμός των πιέσεων επί των θεμελίων κατά **Zimbariewitsch**

Γίνεται παραδεκτό, πως οι τάσεις πίεσεως που εμφανίζονται στους στύλους κατανέμονται αντίστοιχα προς μία επιφάνεια φόρτισης, η οποία καθορίζεται από μια τεθλασμένη γραμμή.



Διανομή των τάσεων στους

στύλους

Οι κλίσεις της τεθλασμένης γραμμής καθορίζονται από τα τμήματα p και q τα οποία δίνονται από την σχέση του **Zimbariewitsch**.

$$q \leq 0.5 * (K - 1) \text{ και } p \leq 0.6 * b$$

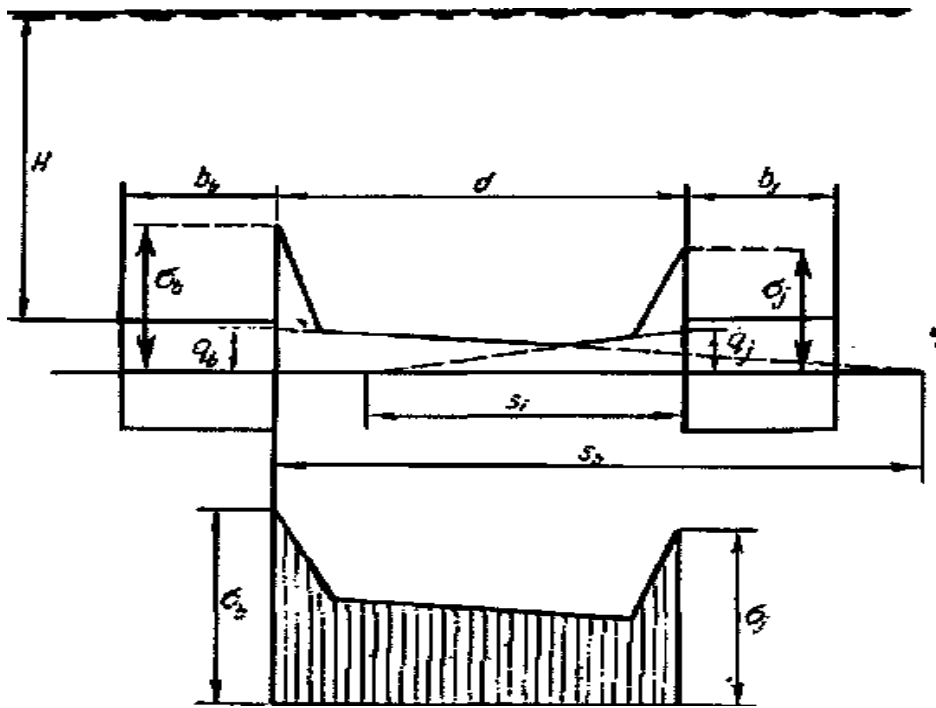
όπου, K μία τιμή συγκεντρώσεως των τάσεων η οποία μετριέται στην διχοτόμο των πλευρικών τοιχωμάτων επί την βάση των αρχών της ελαστικότητας. Η τιμή του K λαμβάνεται από τον παρακάτω πίνακα.

Μορφή διατομής	Κύκλος	Έλλειψη	Ορθογώνιο
Σχέση m/b	1	2/3, 3/2, 3/1	1/1, 1/3, 1/5, 1/18
K	2.75	2.75 3.75 2.2 1.0	1.0 2.0 2.23 5.0

Η απόσταση a πάνω από την οποία εκτείνεται η πρόσθετη πίεση στο στύλο πρέπει να είναι, σύμφωνα με την ελαστική αυτή θεωρία, ίση με $3b$. Αντίστοιχα, μπορεί να τεθεί $S = 2.5 * b$. Εξάλλου, μπορεί οι εμφανιζόμενες, στους στύλους, τάσεις να είναι μικρότερες από ότι επιτρέπεται από την φύση του πετρώματος. Εάν, δηλαδή, η απόσταση του κενού χώρου είναι $d \geq S$, τότε η ανώτερη τιμή ανέρχεται σε $\sigma = (k-1) * \gamma * H$. Εάν, αντίθετα, είναι $d \leq S$, τότε οι τάσεις υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις.

$$s'_b = s_b + q_j \left(1 - \frac{d}{s_j} \right)$$

$$s'_j = s_j + q_b \left(1 - \frac{d}{s_b} \right)$$



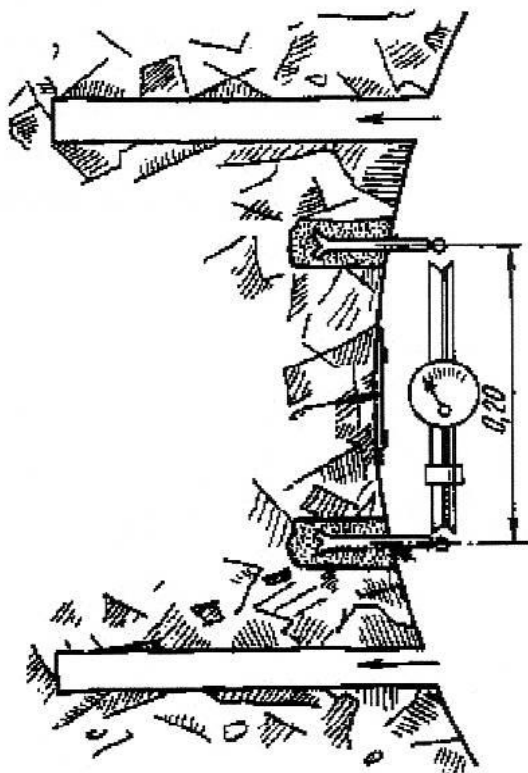
Οι τιμές θα είναι από τις επιτρεπόμενες, μονοαξονικές τάσεις πίεσης, για το πέτρωμα που υπολογίζεται .

ανωτέρω πρέπει να κατώτερες

3.7. Μέθοδοι Μέτρησης Των Ενασκούμενων Πιέσεων Της Σήραγγας

3.7.1 Στην κοιλιά της σήραγγας κατά Talobre

Οι παρούσες, συνήθεις, μηχανικές μέθοδοι μετρήσεων αυτών των δυνάμεων βασίζονται στην αρχή της εκδήλωσης των τάσεων . Πιο συγκεκριμένα, διανοίγονται σχισμές (φρεάτια) στο έδαφος, ενός μέτρου βάθους, με την βοήθεια ενός μετρητή μετατόπισης και μετρούν την εμφανιζόμενη παραμόρφωση .

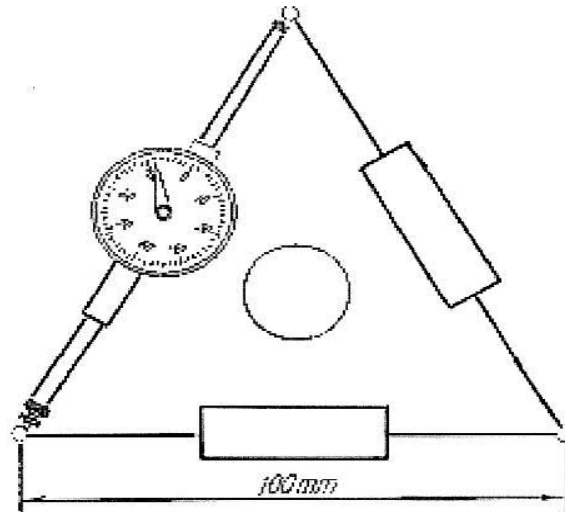


Παλιότερη μέθοδος μέτρησης, βασιζόμενη στην πλήρη εκφόρτιση των προαναφερθέντων σχισμών . Σύνδεση συσκευών μέτρησης πίεσης στην επιφάνεια του κενού χώρου της σήραγγας .

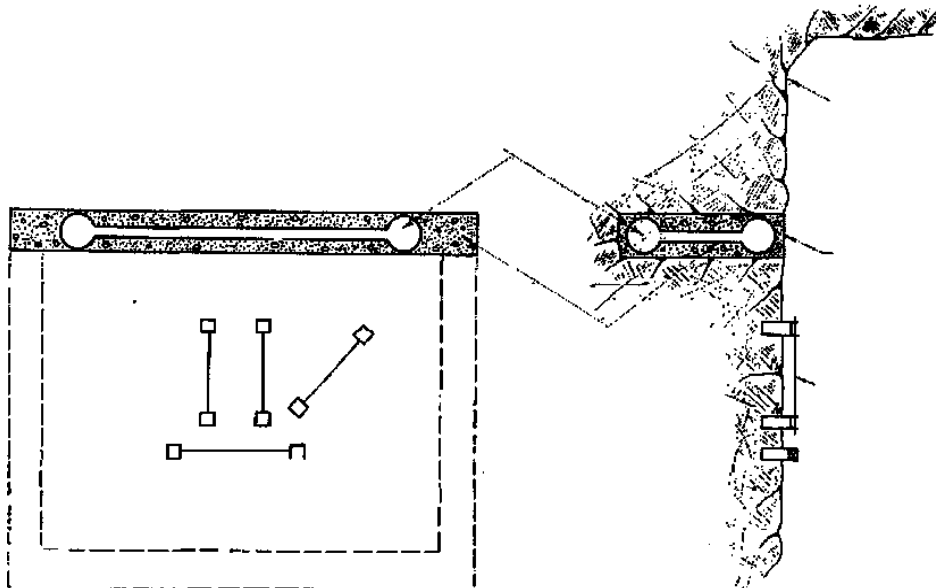
Καταρχήν, τοποθετούμε μεταξύ δύο κατασκευασμένων στηριγμάτων τον μετρητή μετατόπισης . Στην συνέχεια, δημιουργούνται δύο σχισμές (φρεάτια), πάνω και κάτω από το όργανο οι οποίες χρησιμεύουν για την εκτόνωση της πίεσης του εδάφους και τελικά εργαζόμαστε και για μερική, μόνο, εκφόρτιση, όπως στις μετρήσεις στα μέταλλα και μάλιστα, κυρίως για μετρήσεις σε σκληρό βράχο .

Τα ηλεκτρικά όργανα τοποθετούνται υπό την μορφή ενός δέλτα (σχήμα 40), στο μέσο των οποίων κατασκευάζεται μία οπή εκφόρτισης η οποία πρέπει να έχει τέτοιες διαστάσεις ώστε οι πιέσεις των εκτάσεων μέτρησης, που καθορίζονται από το όργανο να ελαττώνονται κατά το $1/3$. Στην περίπτωση αυτή, το εξεταζόμενο γειτονικό πέτρωμα διατηρεί την ελαστική του συμπεριφορά αμείωτη ενώ η πραγματική τιμή της ελαστικότητας πλησιάζει προς τις υπολογιζόμενες τιμές του δείγματος του εδάφους ικανοποιητικά . Η ακρίβεια της μεθόδου αυτής αυξάνει, όταν η οπή γίνεται βαθμηδόν βαθιά οπότε και παρατηρούνται οι εκάστοτε παραμορφώσεις .

Με μήκος πλευρών **200mm** κατασκευάζονται σήμερα με διάτρητες εφοδιασμένους με οπές με διαμάντι, διαμέτρου **56 mm**, οι οποίες δίνουν πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα .



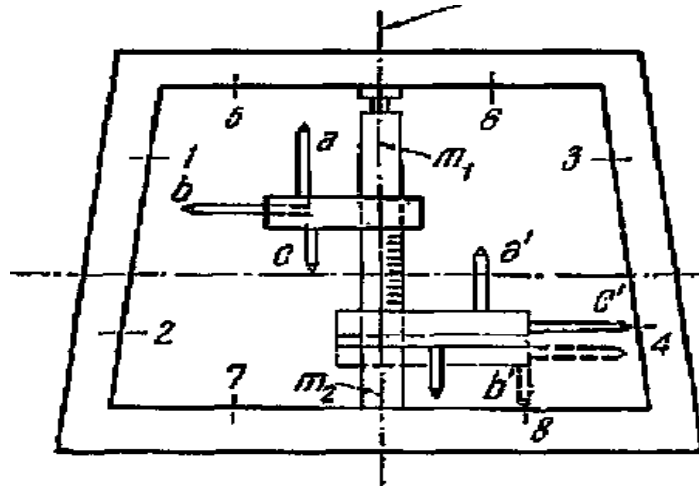
Μία τρίτη, επιφανειακή, μέθοδος στηρίζεται στην αρχή της αποκατάστασης των πιέσεων . Τεντώνονται, αρχικά, τόξα πάνω σε τοιχώματα του βράχου και μετρείται η ηχητική ταλάντωση, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα . Στην συνέχεια, φιξάρεται μία πρέσα **Fregssinet**, μέσω της οποίας προσδιορίζονται οι τάσεις . Ο **Berthier** έκανε μια παραλλαγή στην μέθοδο, κατά την οποία οι τάσεις αποκαθίστανται με ακτινωτές πρέσες .



3.7.2. Στην στηρίζουσα επίστρωση της σήραγγας

Υπάρχουν πολυάριθμες μέθοδοι μετρήσεων που βασίζονται στην χρήση δυναμόμετρων. Οι μετρήσεις εκτελούνται είτε προ της έναρξης της κατασκευής, μέσω της εκ των προτέρων, εισαγωγής προτύπων στοών είτε μετά το πέρας της κατασκευής, για τον έλεγχο αυτής καθώς και για την συλλογή στοιχείων .

Η κατασκευή του σήραγγα αρχίζει, κατά κανόνα, με την διάνοιξη μιας πειραματικής στοάς η οποία στα τοιχώματα της καρφώνονται σιδερένια καρφιά σε αποστάσεις **20m** .

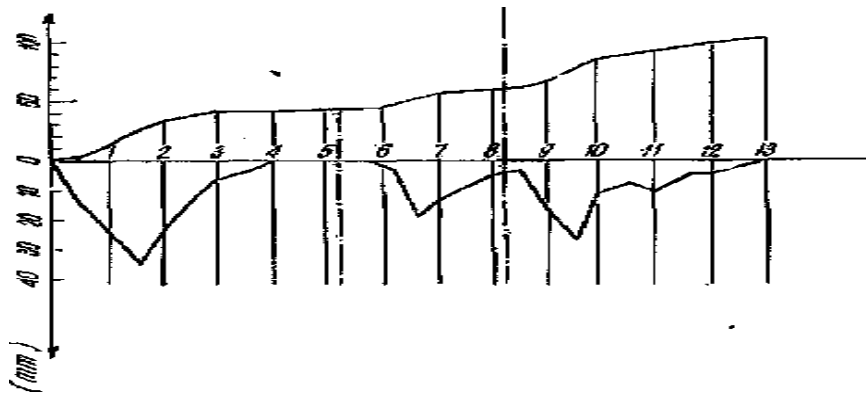


Η κάθετη και σημείων των

οριζόντια θέση των καρφιών, προσδιορίζονται

στην αρχή της κατασκευής εβδομαδιαίως ή δισεβδομαδιαίως ενώ αργότερα μια φορά τον μήνα . Για την ταχεία εκτέλεση των μετρήσεων χρησιμοποιείται ένα πλαίσιο μετρήσεως, αποτελούμενο από απλά στοιχεία, το οποίο στηρίζεται με βίδες μεταξύ θεμελίου και οροφής .

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων των παραμορφώσεων των σημείων των καρφιών, σχεδιάζουμε τις κινήσεις αυτών σε ένα διάγραμμα, όπως το ακόλουθο .



Από το διάγραμμα αυτό φαίνεται καθαρά πόσος χρόνος παρέρχεται μετά

το πέρας των διαφόρων φάσεων των εργασιών μέχρις ότου το έδαφος επανέλθει στην αρχική κατάσταση ισορροπίας . Αυξημένες κινήσεις κατά την διάρκεια των εργασιών κατασκευής δείχνουν αύξηση των πιέσεων έγκαιρα, ώστε να μπορούν να ληφθούν προληπτικά μέτρα .

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων των κινήσεων συγκρίνονται, τελικά, με εκείνα που λαμβάνουμε από τα γεωλογικά συμπεράσματα μας στο εργαστήριο . Έτσι, έχουμε αρκετά στοιχεία για την επιλογή του τρόπου διάνοιξης της σήραγγας καθώς και για τις αναγκαίες διαστάσεις των τοιχωμάτων αυτής .

3.8. Μέτρηση Των Ενασκούμενων Δυνάμεων Επί Των Πλευρικών Τοίχων Της Σήραγγας

Πιο συγκεκριμένα, θα προσδιορίσουμε τον τρόπο που καθορίζονται οι δρώσες επί των τοίχων εξωτερικές δυνάμεις. Τις δυνάμεις αντίδρασης **Vf, Hf, Mf** οι οποίες μεταφέρονται από το θόλο της οροφής, υπολογίζονται σύμφωνα με τις μεθόδους μετρήσεως των θόλων. Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζονται και οι δυνάμεις αντίδρασης που προέρχονται από το θόλο θεμελίων **Va, Ha, Ma**. Στους πλευρικούς τοίχους ενεργεί επί πλέον και η δρώσα πίεση του εδάφους **P**, το ίδιο βάρος των **G** και η ενεργός οριζόντια πίεση του εδάφους **Ea**.

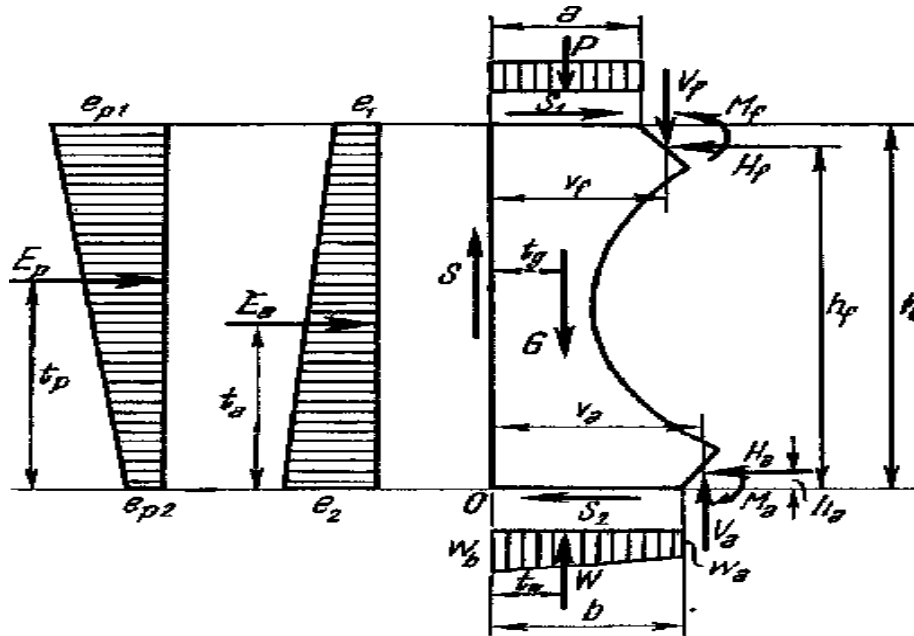
Επειδή οι πλευρικοί τοίχοι στηρίζονται στο έδαφος, με τις επιφάνειες στηρίξεως και τις κάθετες εξωτερικές επιφάνειες τους, οι δυνάμεις αντίδρασης του εδάφους **W** εξισορροπούν τις δυνάμεις φορτίσεως, που ενεργούν σε αυτές τις επιφάνειες.

Από την τριβή μεταξύ εδάφους και πλευρικών τοίχων, προκύπτουν μαζί με τις κάθετες, οι οποίες δρουν στις επιφάνειες επαφής και συνιστώσες αντίδρασης του εδάφους, όπου οι τελευταίες ενεργούν στα επίπεδα των επιφανειών αυτών. Οι τιμές των δυνάμεων τριβής αυτών, υπολογίζονται ως γινόμενα των κάθετων στις επιφάνειες επαφής ενεργουσών δυνάμεων επί του συντελεστή τριβής **tanφ**. Έτσι στις επιφάνειες στηρίξεως των πλευρικών τοίχων, η **δύναμη τριβής** γράφεται συναρτήσεως της εμφανιζόμενης εκεί δύναμης αντιδράσεως **WS₂ = W · tanφ**.

Η δύναμη τριβής στην κάθετη εξωτερική επιφάνεια των πλευρικών τοίχων, με **Ea** για την οριζόντια τιμή της δύναμης αντίδρασης, υπολογίζεται ως εξής. **S = tanφ * (Ea + Ep)**
Τελικά η αντίσταση τριβής στην ανώτερη οριζόντια επιφάνεια των πλευρικών τοίχων υπολογίζεται ως **S₁ = P * tanφ**. Οι υπολογισμοί αυτοί για τα **S** και **S₁** δεν δίνουν ακριβείς τιμές αλλά παριστούν εκείνες τις ανώτατες τιμές που προκαλούνται από μια ορισμένη μετατόπιση (α). Στην πραγματικότητα, εδώ ασχολούμαστε με την απαιτούμενη για την επίτευξη ισορροπίας, τριβή **S₁** η οποία είναι ανάλογη συνήθως προς την μετατόπιση των επιφανειών ολίσθησης.

Η μετατόπιση που αντιστοιχεί στην τριβή υπολογίζεται σε $d_1 = \frac{e^* p_1}{c}$ ενώ η δε μετατόπιση που αντιστοιχεί στην τριβή **S** ως $d = \frac{w}{b^* c}$ και τέλος η αντιστοιχούσα **S₂** σε

$d_2 = \frac{e^* p_2}{c}$, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



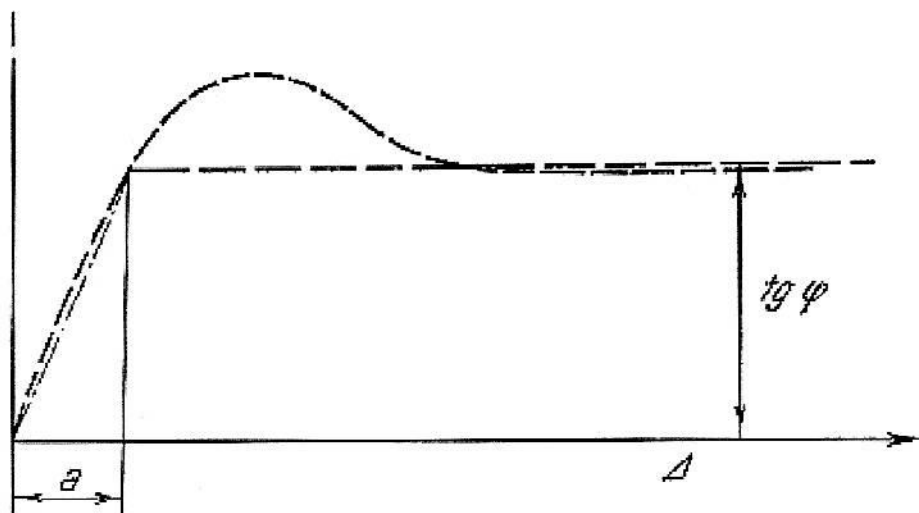
Ωστόσο πρέπει να λάβουμε υπόψη πως οι συντελεστές τριβής f_1, f, f_2 έχουν διάφορες τιμές και προκύπτουν από τις ακόλουθες σχέσεις .

$$f_1 = f_1 = \tan f^* \frac{d_1}{a} = \tan f^* \frac{e^* p_1}{a^* c}$$

$$f = \tan f^* \frac{d}{a} = \tan f^* \frac{w}{b^* a^* c}$$

$$f_{12} = \tan f^* \frac{d_2}{a} = \tan f^* \frac{e^* p_2}{a^* c}$$

Η τιμή της μετατόπισης α βρίσκεται πειραματικά, κατά την προσέγγιση που δίνεται στο κατώτερο σχήμα, όπου παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ μετατόπισης και τριβής καθώς η τιμή της εξαρτάται και από την κατάσταση και την υγρασιακότητα του εδάφους .



Άγνωστα παραμένουν στην συγκεκριμένη περίπτωση, η αντίσταση του εδάφους E_p , η αντίδραση των θεμελίων W και η θέση των γραμμών επιδράσεως και των δύο δυνάμεων, δηλαδή τα μεγέθη t_p και t_w . Εάν οι E_p και W είναι ομοιόμορφα κατανομημένες τότε έχουμε την δυνατότητα να προεκτιμήσουμε τους τέσσερις αγνώστους από ίσο αριθμό εξισώσεων . Όλες οι δρώσες δυνάμεις επί των πλευρικών τοιχωμάτων βρίσκονται σε ισορροπία εφόσον οι οριζόντιες και κάθετες προβολές τους, όπως επίσης και οι ροπές τους ως προς ένα σημείο π.χ. το σημείο O , είναι ίσες προς το μηδέν .

Η τιμή της αντίδρασης των θεμελίων \mathbf{W} προσδιορίζεται από την ακόλουθη σχέση .

$$P + V_f + G - (E_p + E_a) \cdot f - W - V_a$$

Η δε αντίσταση του εδάφους $\mathbf{E_p}$

προσδιορίζεται από την σχέση .

$$P_{f1} - V_f + (E_p + E_a) - W_{f2} - V_a = 0$$

Η εξίσωση :

$$P \frac{a}{2} + V_f \cdot U_f - H_f \cdot h_f - M_f + M_a - H_a \cdot h_a - U_a - H_a + G \cdot t_g - W \cdot t_w + E_a \cdot t_a + E_p \cdot t_p - H_a = 0$$

περιέχει δύο αγνώστους t_p και t_w .

Η τέταρτη εξίσωση προκύπτει με βάση την συνθήκη ότι οι αντιδράσεις του εδάφους είναι ανάλογες των πιέσεων των πλευρικών τοιχωμάτων επί του εδάφους . Τα πλευρικά τοιχώματα θεωρούνται ως απείρως σκληρά, έτσι ώστε οι επιφάνειες στηριξέως ακόμη και μετά την μεταβολή του σχήματος να παραμένουν επίπεδες . Επίσης, η κατανομή των αντιδράσεων του εδάφους έχει πορεία ευθείας γραμμής . Ωστόσο οι οριζόντιες και κάθετες επιφάνειες διατηρούνται αμετάβλητα κάθετες μεταξύ τους, γεγονός από το οποίο προκύπτει πως και οι γραμμές της κατανομής των αντιδράσεων του εδάφους είναι κάθετες μεταξύ τους .

Συνεπώς, έχουμε την εξίσωση .

$$B = \frac{w_b - w_a}{b} = \frac{e_{p1} - e_{p2}}{h}$$

$$w_b = \frac{w}{b} + \frac{6w \left(\frac{b}{2} - t_w \right)}{b^2}$$

$$w_a = \frac{w}{b} - \frac{6w \left(\frac{b}{2} - t_w \right)}{b^2}$$

$$\frac{e_{p1} - e_{p2}}{h} = \frac{12w \left(\frac{b}{2} - t_w \right)}{b^2}$$

Η σχέση μεταξύ των τιμών w_a , w_b , e_{p1} , e_{p2} και t_p , t_w περιγράφουν τις παρακάτω σχέσεις .

$$t_p = \frac{h}{3} \cdot \frac{2e_{p1} + e_{p2}}{e_{p1} + e_{p2}}$$

$$t_w = \frac{b}{3} \cdot \frac{2w_a + w_b}{w_a + w_b}$$

Επίση

ς, πρέπει να ληφθούν υπόψη, περαιτέρω και οι ακόλουθες σχέσεις .

$$\frac{w_b + w_a}{b} = w$$

$$\frac{e_{p1} + e_{p2}}{b} \cdot h = E_p$$

3.9. Υπολογισμός Της Εσωτερικής Επένδυσης Της Σήραγγας

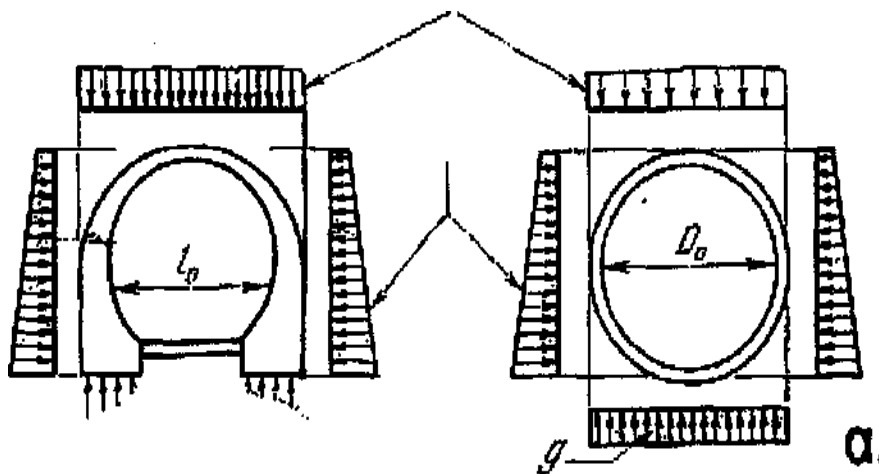
Η εύκαμπτη υποστήριξη λόγω της ευκαμψίας της, επιτρέπει την μείωση της ακτίνας της σήραγγας έτσι ώστε να εμποδίζει την μετατόπιση / χαλάρωση της δομής της βραχώμαζας . Αυτή η παρεμπόδιση έχει σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη πιέσεων πάνω στον εξωτερικό δακτύλιο, ο οποίος με την σειρά του ασκεί ίση και αντίθετη πίεση πάνω στα τοιχώματα της σήραγγας . Έτσι, τώρα θα αναπτυχθούν κάποιες διατμητικές αντιστάσεις στις πλαστικές ζώνες, γεγονός που αποτελεί και την διαφορά της σήραγγας με υποστήριξη με εκείνη που αυτοϋποστηρίζεται .

Γενικά όσο μεγαλύτερες οι αντιστάσεις που προβάλλει ο εξωτερικός δακτύλιος τόσο λιγότερο αξιοποιείται η διατμητική αντοχή του βράχου . Συνεπώς υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ βραχώμαζας – υποστήριξης και αποκαλείται ως το σύστημα βράχου – υποστήριξης .

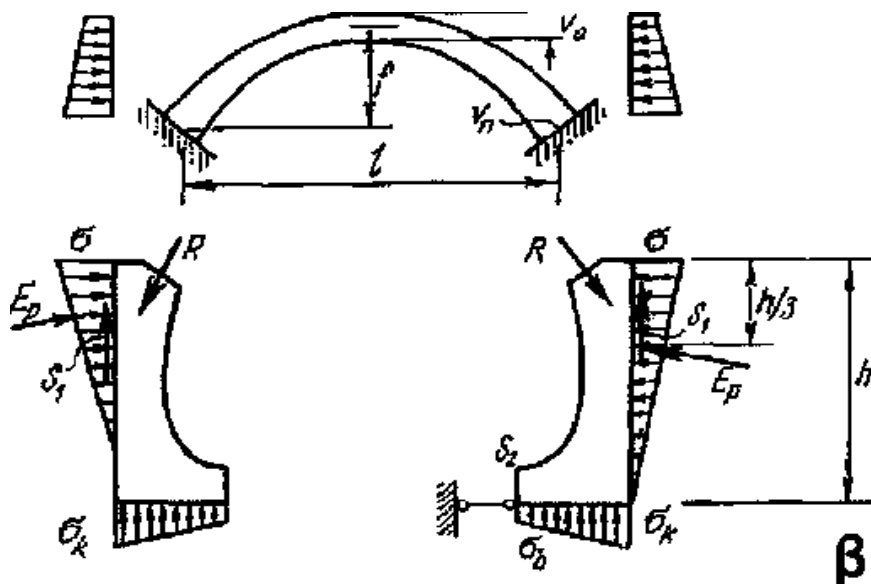
Ο εξωτερικός δακτύλιος αποτελείται από μία ή περισσότερες στρώσεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος, κάθε μια πάχους $5 \div 10$ cm, συνήθως με χαλύβδινο πλέγμα ή χαλύβδινες ίνες . Επίσης από χαλύβδινα τόξα ολισθαίνοντα, τα οποία επιτρέπουν την μείωση της διατομής της σήραγγας καθώς και από σύστημα μη προεντεταμένων αγκυριών .

Αναλυτικότερα, ο εύκαμπτος μανδύας από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα μπορεί να γίνει σε ένα στάδιο αμέσως μετά τη διάνοιξη ή σε περισσότερα στάδια όπου το πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος αυξάνεται σταδιακά . Κατά την σταδιακή κατασκευή του μανδύα γίνεται παράλληλη ενίσχυση με αγκύρια καθώς ο ίδιος ενισχύεται με την τοποθέτηση χαλύβδινου πλέγματος . Κατά μήκος της σήραγγας ή παράλληλα με τον άξονα της προβλέπονται διαμήκεις εγκοπές διαστολής όπου τοποθετείται μόνο το πλέγμα και όχι το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα προκειμένου να γίνεται εκτόνωση των πιέσεων μέσω της μείωσης της ακτίνας της σήραγγας .

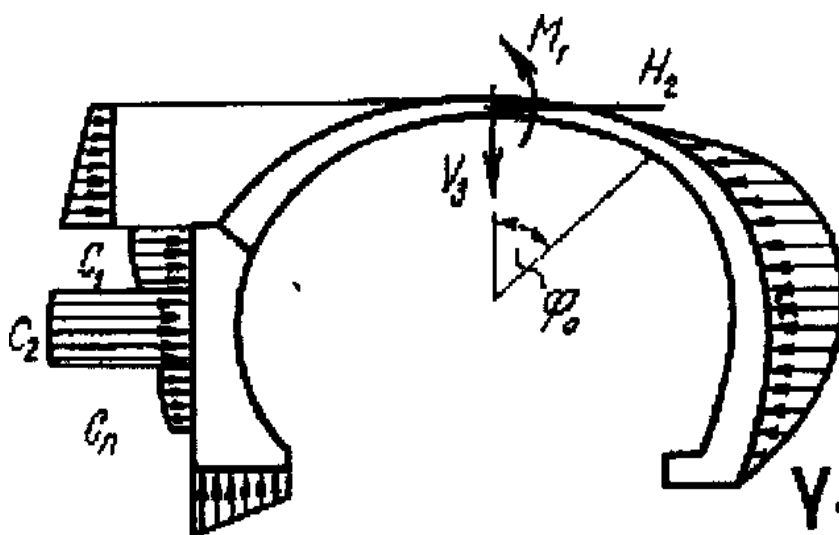
Το μέγεθος και οι διευθύνσεις των φορτίων που θα καταπονήσουν την προσωρινή υποστήριξη και τελικά και την μόνιμη επένδυση εξαρτώνται από πολλές παραμέτρους, όπως από το αν το έδαφος είναι βραχώδες ή αν είναι εδαφικός σχηματισμός, από τη φορτική ιστορία και την αντοχή του εδάφους, από το βάθος και τη γεωμετρία του έργου, από τον προσανατολισμό και την ένταση του πρωτογενούς τασικού πεδίου και τον τρόπο εφαρμογής των μέτρων υποστήριξης . Το τελευταίο είναι ένα φαινόμενο, από την αξιολόγηση του οποίου θα εξαρτηθεί κατά πόσο το ίδιο το έδαφος θα αναλάβει να παίζει ενεργό ρόλο στην παραλαβή ενός σημαντικού μέρους των φορτίων .



Μονολιθική σκληρά διατομή χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η υποστήριξη



Σκληρά διατομή υποστηριζόμενη πλαγίως από την αντίσταση του εδάφους



Σχήμα

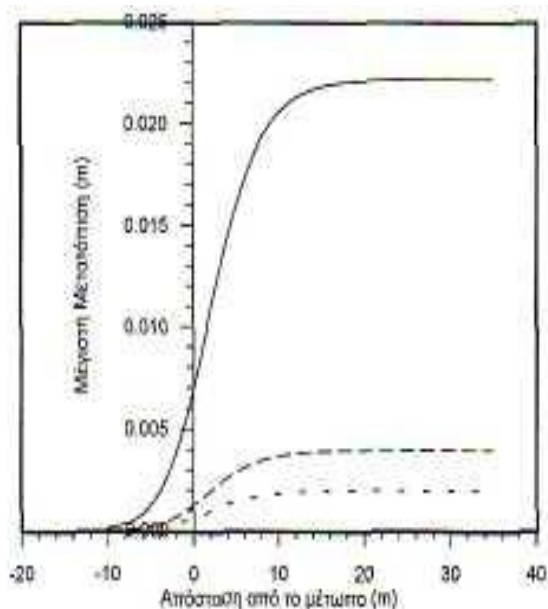
κατανομής των

δρυσών εξωτερικών δυνάμεων επί μιας μονολιθικής εύκαμπτης διατομής σήραγγα

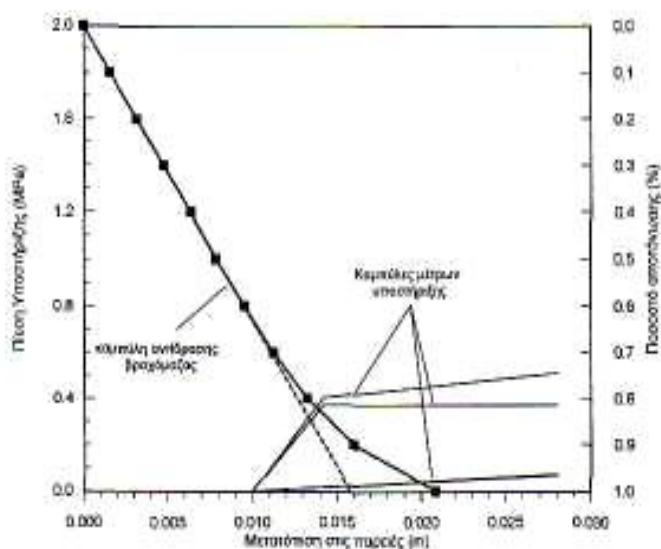
Αν λοιπόν στην περίπτωση των θεμελιώσεων ο Μηχανικός αξιοποιήσει τη φέρουσα ικανότητα του εδάφους για να σχεδιάσει την θεμελίωση, η ανάγκη να αξιοποιηθεί η ικανότητα του υπόγειου ανοίγματος να αυτοϋποστηρίζεται στο μέγιστο δυνατό βαθμό εμφανίζεται ιδιαίτερα επιτακτική, κυρίως όταν πρόκειται για υπόγεια ανοίγματα μεγάλου μήκους, όπως για παράδειγμα είναι πολλές οδικές σήραγγες, όπου η έκταση των μέτρων υποστήριξης επηρεάζει σημαντικά το κόστος της κατασκευής .

Η μετατόπιση ενός σημείου στο τοίχωμα της σήραγγας δύναται να εκφραστεί σαν συνάρτηση της απόστασης από το μέτωπο με εμπειρικές σχέσεις, όπως αυτή που δίνεται γραφικά στο επόμενο σχήμα . Αντίστοιχα οι μετατοπίσεις δύναται να εκφραστούν συναρτήσει της απαιτούμενης πίεσης υποστήριξης με τη βοήθεια της «καμπύλης αντίδρασης της βραχώμαζας» (**ground reaction curve**) η οποία είναι σιγμοειδούς μορφής .

Τυπική μορφή καμπύλης μετατόπισης ενός σημείου της σήραγγας σε συνάρτηση με την απόσταση του από το μέτωπο

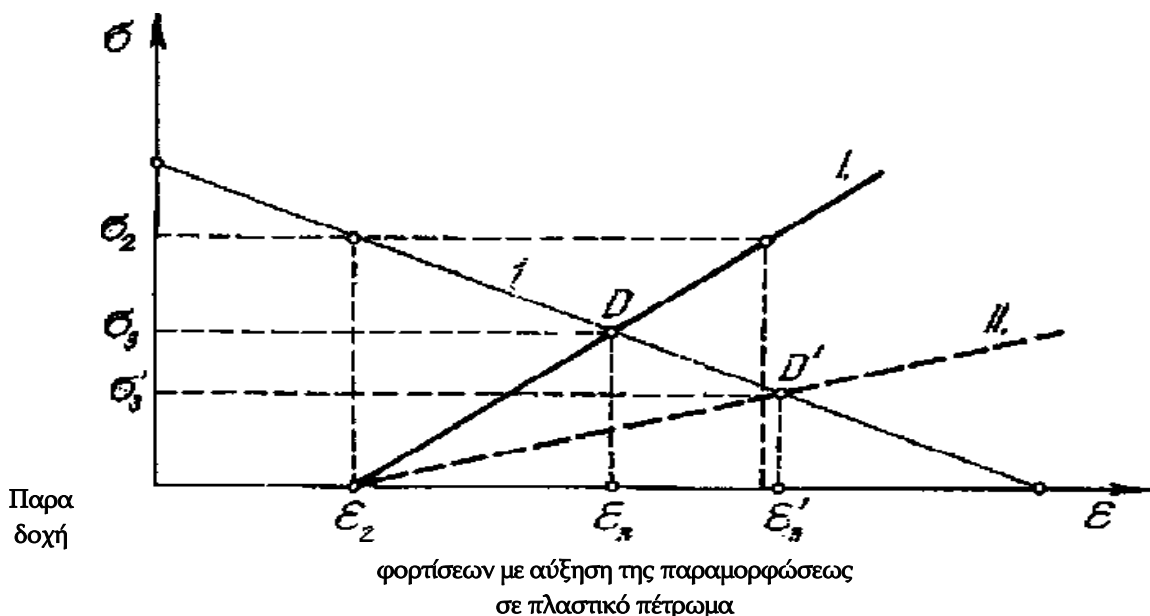


Επομένως από το συνδυασμό της καμπύλης αντίδρασης της βραχώμαζας και της καμπύλης του **Panet** είναι δυνατό να εκτιμηθεί η απαιτούμενη πίεση υποστήριξης ή το ποσοστό αποτόνωσης και η αναμενόμενη μετατόπιση κάθε σημείου του τοιχώματος της σήραγγας για οποιαδήποτε απόσταση από το μέτωπο .

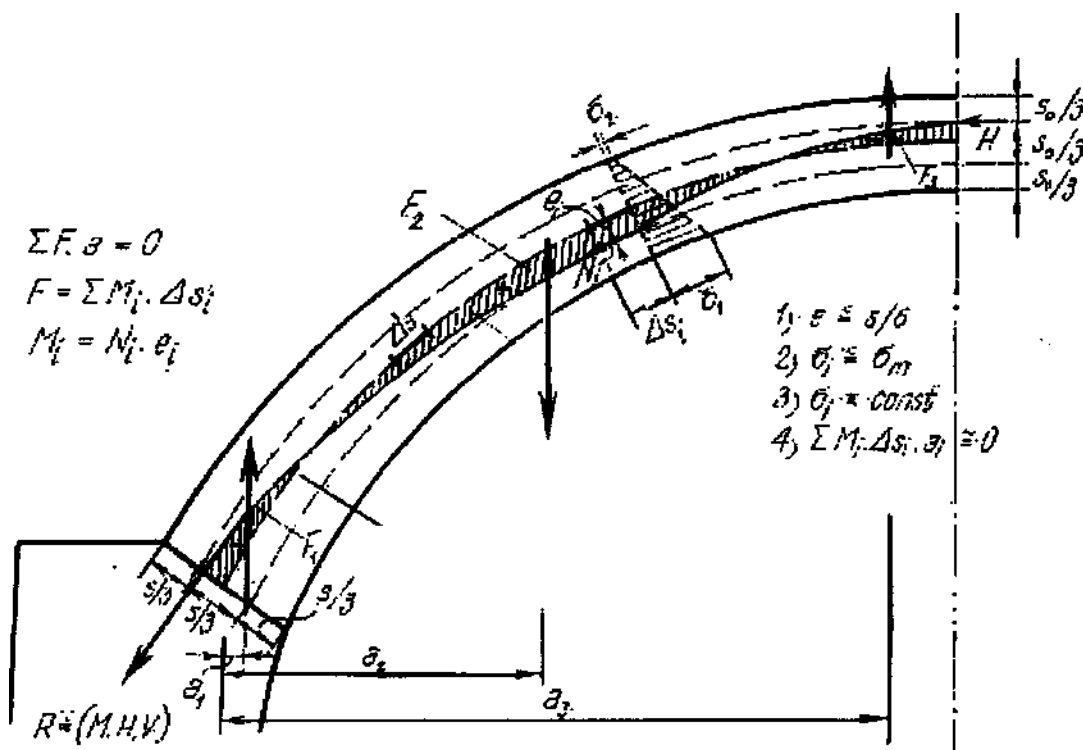


Τυπικές καμπύλες αλληλεπίδρασης βραχώμαζας - μέτρων υποστήριξης

Στα υπόγεια τεχνικά έργα προκύπτουν βασικές διαφορές στον τρόπο επιμέτρησης τους και κυρίως λόγω του γεγονότος ότι, οι ενεργούσες πιέσεις μεταβάλλονται με το χρόνο . Μάλιστα, στην περίπτωση πλαστικού εδάφους, υφίσταται μια ταχεία προοδευτική μείωση της πίεσεως . Την μείωση της πίεσεως αυτής παριστά ο **Mohr** στο παρακάτω σχήμα, με μια κεκλιμένη ευθεία γραμμή **(1)** . Από το εν λόγω σχήμα προκύπτει πως οι τάσεις σ του εδάφους μειώνονται αυξανόμενης της παραμορφώσεως ϵ . Εάν μέχρι την κατασκευή των τοιχωμάτων έλαβε χώρα μια παραμόρφωση ϵ_2 , τότε η αρχική τάση υποχωρεί αυτομάτως στο επίπεδο σ_2 . Επειδή η παραμόρφωση του εδάφους συνεχίζεται, αυξάνει βαθμηδόν η επί της επένδυσης δρώσα φόρτιση **(I)** . Τελικά, στο σημείο τομής **D** των δύο ευθειών αντιστοιχεί τάση σ_3 που παριστά την φόρτιση της επένδυσης του σήραγγα .



Η παραμόρφωση μπορεί να συνεχίζεται, μόνο όταν το επιτρέπει η υποχωρητικότητα της επένδυσης . Μια ανυποχώρητη κατασκευή παρουσιάζει κατά τη στιγμή της ανόρυξης του κενού χώρου, την τάση σ_2 . Στην υποχωρητικότητα του τοιχώματος συμβάλλουν και άλλοι παράγοντες όπως η δυνατότητα παραμορφώσεως του και η ελαστικότητα του . Όσο μικρότερη είναι η τιμή του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους E , τόσο πιο οριζόντια γίνεται η γραμμή υποδοχής των τάσεων (II) . Τέμνονται δε οι δύο γραμμές σε ένα σημείο, έστω D' , με τάση σ_3' . Πρέπει να τονισθεί όμως, πως οι διαπιστώσεις αυτές έχουν ισχύ μόνο για τις φορτίσεις που προέρχονται από την πραγματική πίεση του εδάφους, δηλαδή μόνο στην πλαστική περιοχή των τάσεων .



Συνθήκες για την πορεία της γραμμής υποστηρίξεως

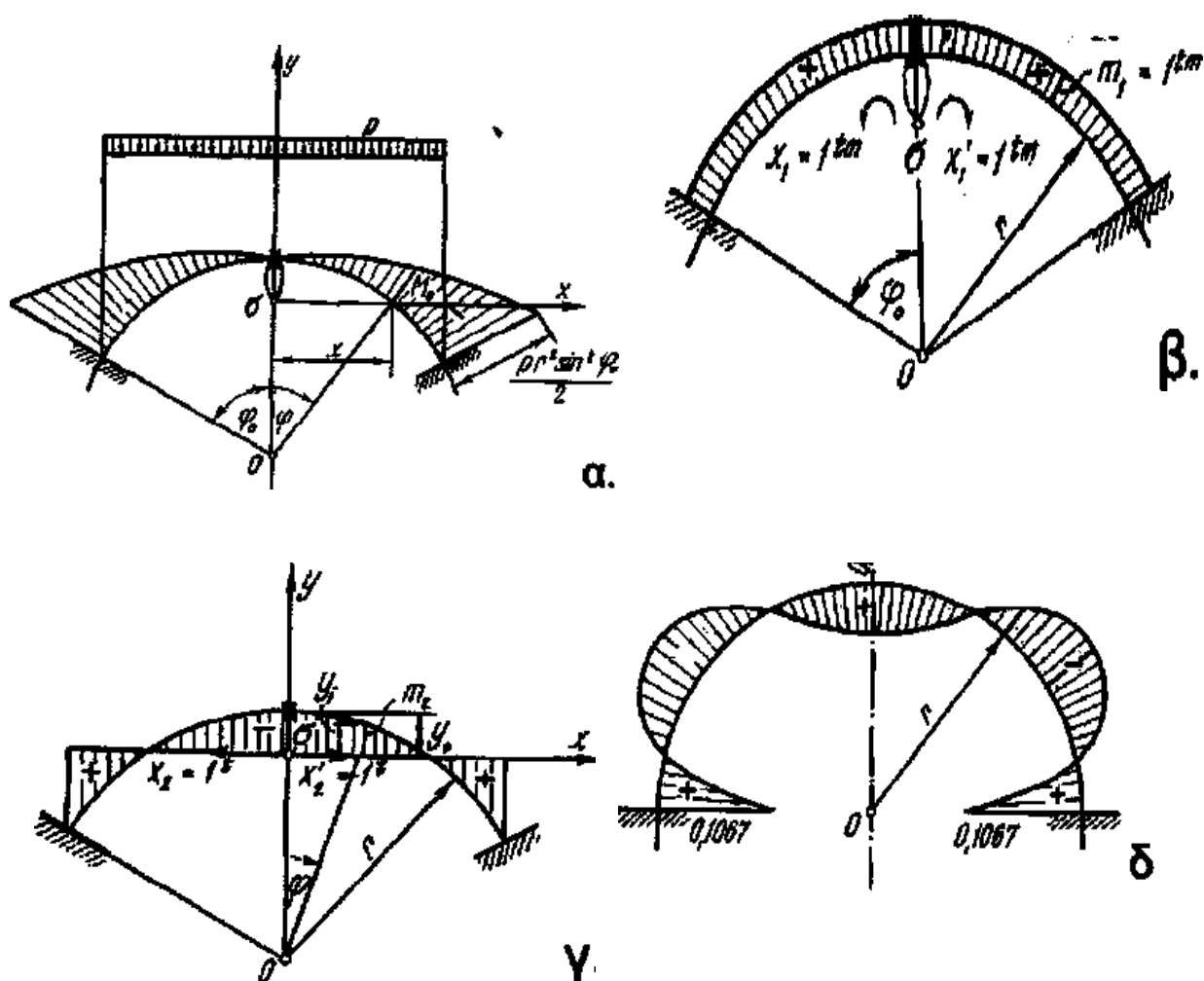
Σε οποιαδήποτε διατομή της σήραγγας με καθορισμένο φορέα υπολογίζονται στατικά, η ροπή και η αξονική δύναμη ως ακολούθως .

$$M = M_0 + m_1 \cdot x_1 + m_2 \cdot x_2 = M_0 + 1 \cdot x_1 + x_2 \cdot y$$

$$N = N_0 + n_1 \cdot x_1 + n_2 \cdot x_2 = N_0 + 0 + x_2 \cdot \sigma \nu \nu \varphi$$

Οι ροπές για το τόξο με $\varphi = 90^\circ$ προκύπτουν από το ακόλουθο σχήμα .

$$x_1 = 0.25 \cdot pr^2 \quad \text{και} \quad x_2 = 0.56 \cdot pr$$



Η μέγιστη ροπή έχει την τιμή που προκύπτει από την σχέση :

$$M_{\max} = -\frac{pr^2 \cdot \sin j_o}{2} + 0.25 pr^2 + (-y_o + r - r \cos j_o) \cdot 0.56 pr = 0.1067 pr^2$$

Με βάση τους τύπους αυτούς κατασκευάστηκαν εύχρηστοι πίνακες που καθιστούν δυνατό τον απλό υπολογισμό των ροπών και ορθών δυνάμεων που εμφανίζονται στις σημαντικότερες διατομές της σήραγγας .

Ο υπολογισμός αυτός, όταν η κάθετη φόρτιση θεωρείται ομοιόμορφα κατασκευασμένη γίνεται επί τη βάση των ακόλουθων σχέσεων οι οποίες εξάγονται με τη βοήθεια των ακόλουθων σχημάτων .

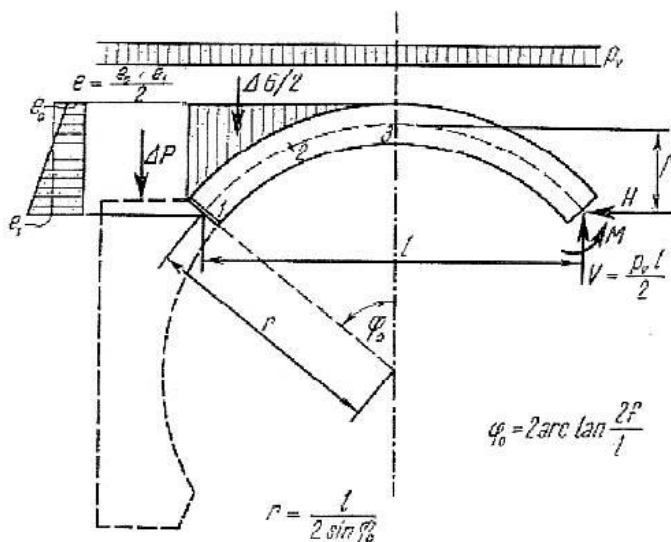
$$M = \alpha_M \cdot pl^2$$

$$H = \alpha_H \cdot pl$$

$$V = p \cdot l/2$$

Όταν η φόρτιση είναι οριζόντια ο υπολογισμός γίνεται με τη βοήθεια των παρακάτω σχέσεων .

$$M = \beta_M \cdot e \cdot l^2 \quad \text{και} \quad H = \beta_H \cdot e \cdot l$$



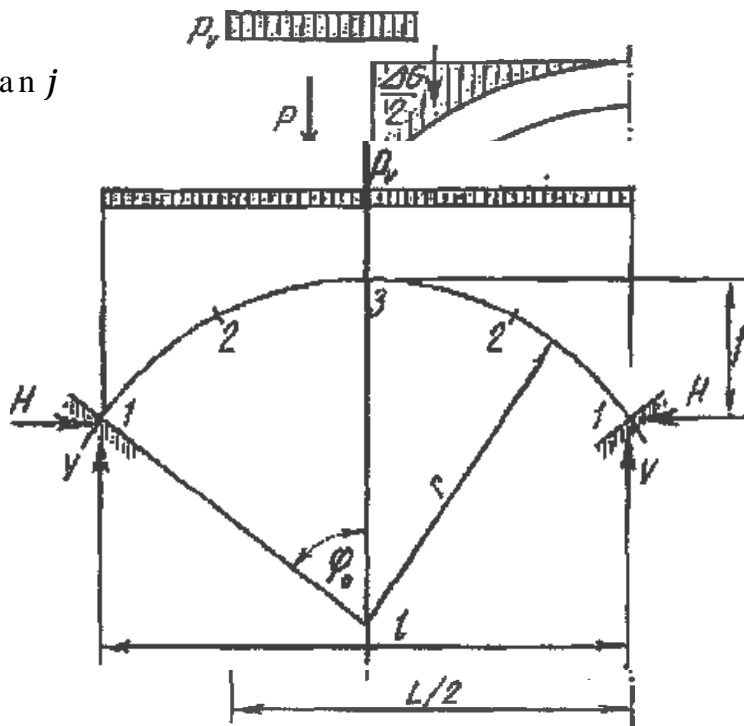
Οι τιμές των α_m και α_h στις διατομές (1), (2), (3) των ανωτέρω σχημάτων περιέχονται στον Πίνακα 5 . Με γνωστές τώρα τις τιμές των ροπών και της κανονικής πίεσης καθορίζονται οι αντιστάσεις με βάση τον παρακάτω τύπο ο οποίος δίνει την έκκεντρη πίεση και τέλος μετρούνται οι διατομές .

$$\sigma_{1,2} = N / F + M / u$$

Εάν δεν ταιριάζουν οι διατομές, που υπολογίστηκαν με βάση τις παραπάνω σχέσεις, οι υπολογισμοί πρέπει να γίνουν εκ νέου, διότι J και F επηρεάζουν τις μεταβολές της μορφής και επομένως και τις δυνάμεις .

Κατά τον υπολογισμό του θόλου των θεμελίων ενεργούμε ομοίως . Κατά τον υπολογισμό των απαιτήσεων αυτού λαμβάνεται υπόψη εκτός από το βάρος του και οι αντιδράσεις του εδάφους, που αντιστοιχεί στην πλήρη ή την ενδεχόμενη μειωμένη πίεση του εδάφους . Από τα φορτία, η αντίσταση τριβής, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, που εμφανίζεται κατά μήκος των πλευρικών τοιχωμάτων πρέπει να αφαιρεθεί και είναι :

$$s = \left[E_p - h \frac{e_1 - e_2}{2} \right] \cdot \tan j$$



Για το φορτίο που δρα κάθετα στο θόλο των θεμελίων ισχύει η ακόλουθη σχέση .

$$P'_u = \left(g \cdot \frac{\Delta G + 2P + 2Qd - 2S}{L} \right) \cdot \frac{L_k}{L_m}$$

όπου, g το βάρος μονάδος και δ είναι εκείνο το ποσοστιαίο τμήμα της εξωτερικής πίεσης του εδάφους (**2Q**), που αναπτύσσεται αμέσως μετά τον σχηματισμό του θόλου αυτού, για πλαστικά εδάφη είναι $\delta = 40 - 50\%$.

3.10. Διαστασιολόγηση Τελικής Επένδυσης Σήραγγας

Ο υπολογισμός της τελικής επένδυσης ενός υπόγειου έργου πραγματοποιείται χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η συμμετοχή της προσωρινής επένδυσης, σύμφωνα με τις απαιτήσεις των Ο.Σ.Μ.Ε.Ο. Για την διαστασιολόγηση της τελικής επένδυσης συνυπολογίζονται οι ακόλουθες φορτίσεις .

- **LC1 : Ίδιο βάρος**

Αυτόματα από το πρόγραμμα με $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$

- **LC2 : Ομοιόμορφο Φορτίο της Περιβάλλουσας Βραχώμαζας**

Επιβάλλεται μία σταθερή εξωτερική πίεση **266 kPa** σε όλον τον φορέα. Αυτή η φόρτιση έχει προκύψει συντηρητικά, εφαρμόζοντας την μέθοδο σύγκλισης - αποτόνωσης, και υποθέτοντας ότι το φορτίο που αναλαμβάνεται από την προσωρινή υποστήριξη μεταφέρεται εντελώς στην μόνιμη επένδυση (βλ.

GEOTECHNICAL AND STRUCTURAL - DESIGN RE-DESIGN OF THE BENCH EXCAVATION PHASE AND LONG-TERM STABILITY MEASURES, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2002, ΕΚΔΟΣΗ Α) .

- **LC3 : Ανομοιόμορφο Φορτίο της Περιβάλλουσας Βραχώμαζας**

Επιβάλλεται μία συμμετρική μη-ομοιόμορφη πίεση, που αρχίζει από το σημείο γέννησης του τόξου με μηδενική τιμή και καταλήγει στην στέψη της σήραγγας με την μέγιστη τιμή. Η μέγιστη τιμή εξαρτάται από το ύψος της υπερκείμενης βραχώμαζας. Για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης, θα χρησιμοποιηθεί η τιμή των **281.35 kPa**. Αυτή η φόρτιση είναι το βάρος της κατ' υπόθεση πλαστικής ζώνης της βραχώμαζας .

(βλ. **GEOTECHNICAL AND STRUCTURAL - DESIGN RE-DESIGN OF THE BENCH EXCAVATION PHASE AND LONG-TERM STABILITY MEASURES, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2002, ΕΚΔΟΣΗ Α**) .

- **LC4 : Βάρος Η/Μ Εγκαταστάσεων**

Λαμβάνεται υπόψη το φορτίο της τουρμπίνας εξαερισμού $W = 15 \text{ kN}$, αναρτημένης στην οροφή της σήραγγας .

- **LC5 : Ομοιόμορφη Υδροστατική Πίεση Εξωτερικά**

Αν και προβλέπεται σύστημα αποστράγγισης γύρω από την σήραγγα, εφαρμόζεται μία συμβατική υδατική πίεση της τάξεως των $W = 50 \text{ kPa}$ (ομοιόμορφη) ώστε να ληφθεί υπόψη μία τυχαία απρόβλεπτη αστοχία του συστήματος αποστράγγισης σε κάποιο μήκος της σήραγγας .

- **LC6 : Ομοιόμορφη αύξηση θερμοκρασίας κατά $\Delta T = 10^\circ \text{ C}$**

- **LC7 : Διαφορά θερμοκρασίας $\delta T = 5^\circ \text{ C}$ πάνω-κάτω**

- **LC8 : Συστολή πήξης μόνιμης επένδυσης**

Λαμβάνεται υπόψη με ισοδύναμη ομοιόμορφη μείωση της θερμοκρασίας της πλάκας του φορέα κατά $\Delta T = -11^\circ \text{ C}$.

- **LC9 : Έκρηξη στο εσωτερικό της σήραγγας**

Λαμβάνεται υπόψη με ισοδύναμη ομοιόμορφη ομοιόμορφη πίεση $q = 100 \text{ kN/m}^2$.

- **LC10 : Φορτίο Πρόσκρουσης Οχήματος Αριστερά**

Λαμβάνεται υπόψη με σημειακό φορτίο $Q = 100 \text{ kN}$ σε ύψος **1.50 m** από την στάθμη της ερυθράς γραμμής της οδού .

- **LC11 : Φορτίο Πρόσκρουσης Οχήματος Δεξιά**

Λαμβάνεται υπόψη με σημειακό φορτίο $Q = 100 \text{ kN}$ σε ύψος **1.50 m** από την στάθμη της ερυθράς γραμμής της οδού .

- **LC12 : Πίεση Διόγκωσης**

Κατά τον έλεγχο της επάρκειας της τελικής-μόνιμης επένδυσης, λαμβάνεται υπόψη η τυχόν πίεση της περιβάλλουσας βραχώμαζας στην ανεστραμμένη πλάκα του φορέα, μέσω ομοιόμορφης εξωτερικής πίεσης **100 kPa** .

{ LC : Load Case }

3.11. Διαστασιολόγηση Διατομής Σήραγγας

Έκτος από την ανωτέρω εξέταση των φορτίσεων, προς ανάλυση της τελικής υποστήριξης της σήραγγας, αναλύονται και οι παρακάτω συνδυασμοί φορτίσεων για την διαστασιολόγηση της διατομής της σήραγγας . Από τους τελευταίους θα επιλεγεί ο δυσμενέστερος και με βάσει αυτόν, θα διαστασιολογηθεί η κάθε διατομή του υπόγειου έργου .

- **LC21:** (LC1) + (LC2) + (LC3) + (LC4)

- **LC22:** (LC1) + (LC2) + (LC3) + (LC4) + (LC5)

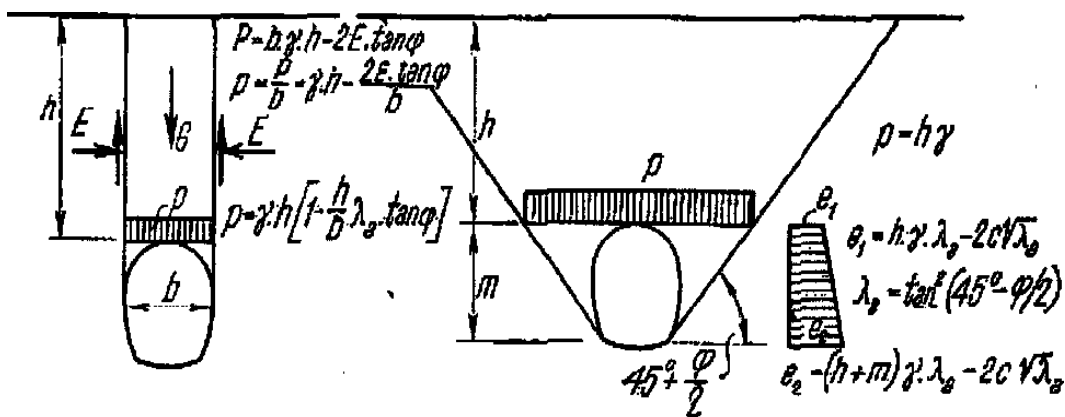
- **LC23:** (LC1) + (LC2) + (LC3) + (LC4) + (LC9)
- **LC24:** (LC1) + (LC2) + (LC3) + (LC4) + (LC6) + (LC7)
- **LC25:** (LC1) + (LC2) + (LC3) + (LC4) - (LC6) + (LC7) + (LC8)
- **LC26:** (LC1) + (LC2) + (LC3) + (LC4) - (LC6) - (LC7) + (LC8)
- **LC27:** (LC1) + (LC2) + (LC3) + (LC4) + (LC10)
- **LC28:** (LC1) + (LC2) + (LC3) + (LC4) + (LC11)
- **LC 31–38:** Ομοίως όπως οι συνδυασμοί φορτίσεων LC21 έως LC28 με την προσθήκη της επιπλέον πίεσης που προκύπτει από την θεώρηση της φόρτισης LC12 “Πίεση Διόγκωσης” .

3.12. Κανόνες Παραδοχής Φορτίων Για Τα Υπόγεια Έργα

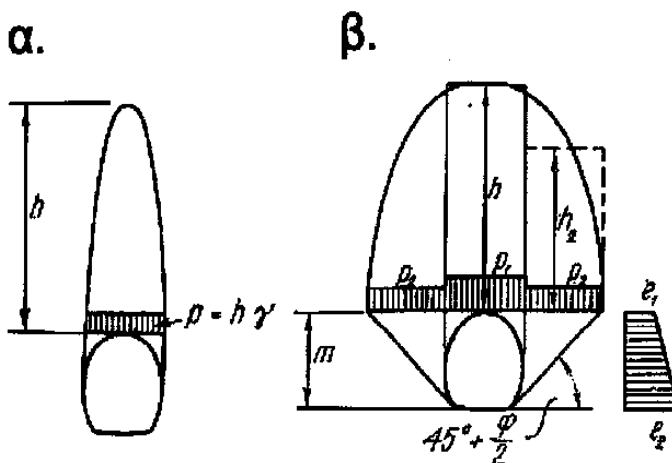
3.12.1. Αρχές εύρεσης των φορτίων, για βαθιά κείμενη σήραγγα, σε στερεό βράχο

Τέτοιοι, γενικοί, κανόνες δίνονται μόνο σε εξαιρετικές περιπτώσεις, λόγω των πολλών παραγόντων που επηρεάζουν το επιτρεπόμενο φορτίο, όπως είναι το έδαφος, το είδος του εδάφους, ο τρόπος κατασκευής, η σκληρότητα της επένδυσης και η μορφή της κατασκευής . Για το λόγο αυτό, το επιτρεπόμενο φορτίο σε σήραγγα και στοές, εξαρτάται από τις δοσμένες, εκάστοτε, συνθήκες .

Οι επιφάνειες ολίσθησης, που σχηματίζονται στην είσοδο του σήραγγα, φθάνουν επάνω στην επιφάνεια του εδάφους, σχήμα 44 I . Σε βράχο με μεγάλη συνοχή, δεν εμφανίζεται καμιά πλευρική πίεση και έτσι, το σώμα φόρτισης, ορίζουν τα κάθετα επίπεδα, τα οποία διαγράφουν το εξωτερικό άκρο της κοιλίας του σήραγγα. Στις επιφάνειες αυτές εμφανίζεται πίεση ηρεμίας, οπότε η δύναμη φόρτισης προκύπτει ως η διαφορά μεταξύ της μάζας του εδάφους και της δύναμης που προέρχεται από την αμφίπλευρη πίεση της γης, σχήμα 44Iα . Σε χαλαρό έδαφος, εμφανίζονται, εκτός από τις κάθετες και πλευρικές πιέσεις. Τα σώματα φόρτισης περιορίζονται, όχι από τις κάθετες, αλλά από δύο επιφάνειες ολίσθησης, οι οποίες σχηματίζουν με την οριζόντιο, γωνία 45 . Η κάθετη φόρτιση υπολογίζεται σε $p = \gamma \cdot h$ ενώ το σχήμα των οριζοντίων πιέσεων λαμβάνει σχήμα τραapeζίου, σχήμα 44Iβ .



Σχήμα 44 I

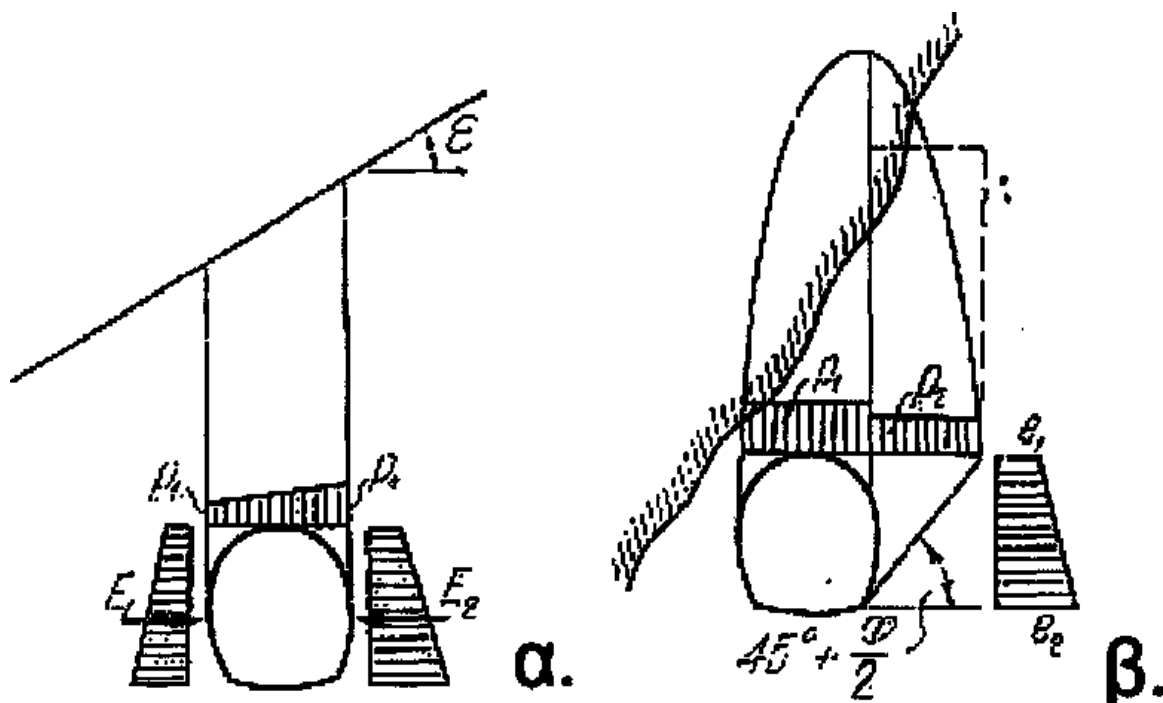


M
ε την
προοδε
υτική
είσοδο

στο εσωτερικό του εδάφους, οι επιφάνειες ολίσθησης δεν φθάνουν πια μέχρι την επιφάνεια του εδάφους αλλά δημιουργείται ένα προστατευτικό περίβλημα . Το σήραγγα πιέζει - φορτίζει σε αυτή την περίπτωση, μόνο το άνω σώμα τάσεων . Η επένδυση σήραγγα, εδώ, μπορεί να μετρηθεί για ύψη, πλέον των **30 - 50** μέτρων άνω της επιφάνειας του . Εάν δεν εμφανίζεται πλευρική πίεση, το σώμα φόρτισης λαμβάνεται, για την σχεδίαση της παραβολής ή της έλλειψης, πάνω από την εγκάρσια τομή του σήραγγα, με την βοήθεια του υπολογιστικά, ευρεθέντους ύψους **h**, σχήμα **44IIα** . Εάν εμφανίζεται πλευρική πίεση, κατασκευάζουμε τις επιφάνειες ολίσθησης με κλίσεις **45 + φ/2** ως προς την οριζόντιο . Οι επιφάνειες αυτές τέμνονται από το επίπεδο της κορυφής του θόλου . Μετά, με ένα σημείο τομής σχηματίζεται η παραβολή ύψους **h** . Τις τάσεις φόρτισης, τις λαμβάνουμε άμεσα από τον διαχωρισμό του σχήματος σε ελάσματα . Στο σχήμα **44IIβ**, **p** είναι η μέση τιμή της κάθετης φόρτισης και **p_z** οι πλευρικές πιέσεις .

Η επικλινή μορφή επιφάνειας, επηρεάζει τον υπολογισμό της φόρτισης απλώς και μόνο στην είσοδο . Στις περιπτώσεις αυτές, η κάθετη φόρτιση λαμβάνει την μορφή τραπέζιου ενώ οι δρώσες πλευρικές τάσεις δεν γίνονται ίσες μεταξύ τους, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα (α) . Σε πιο στερεό πέτρωμα, στο οποίο δεν ενεργούν δρώσες πλευρικές πιέσεις, γίνεται παραδεκτή η ύπαρξη μιας παθητικής πίεσης μόνον, όταν μεταξύ κατώτερης και κεκλιμένης επιφάνειας υπάρχει μία απόσταση **10-12** μέτρων .

Ιδιαίτερη θέση προσλαμβάνουν τα σήραγγα, όταν κατασκευάζονται παράλληλα με ρωγμές του εδάφους ή κατά μήκος ορίων δύο στρωμάτων, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα (β) . Σε αυτές τις κρίσιμες για τις μετρήσεις του προφίλ, θέσεις του εδάφους, το σήραγγα φορτίζεται ασύμμετρα . Εδώ, η μάζα του πετρώματος εξασκεί και οριζόντιες πιέσεις .



3.12.2. Αρχές εύρεσης των φορτίων, για διανοιγόμενη σήραγγα, παρά την επιφάνεια διαβραχέντων χαλαρών εδαφών

Όταν το βάθος της σήραγγας είναι μικρό, δηλαδή $H \leq 2.5 * B$, η κάθετη φόρτιση προκύπτει από το βάρος όλων των μαζών που βρίσκονται υπεράνω αυτού. Σήραγγα που βρίσκονται κάτω του επιπέδου του υπόγειου ύδατος, φορτίζονται με το βάρος των υπερκείμενων εδαφικών μαζών καθώς και της μάζας του υπόγειου ύδατος. Εάν h είναι το ύψος της μάζας του εδάφους από τη σήραγγα μέχρι την επιφάνεια, t το ύψος του υδάτινου στρώματος και εάν $t \leq h$, τότε έχουμε για την φόρτιση την παρακάτω εξίσωση.

$$p_u = (h - t) g_s (1 - n) + t [g_s (1 - n) + 1 * n]$$

3.12.3. Κανόνες εύρεσης των φορτίων, για την υπόγεια σιδηροδρομική σήραγγα της Λισσαβόνας

Οι κανόνες παραδοχής των φορτίων, στην μελέτη της σιδηροδρομικής σήραγγας της Λισσαβόνας, πραγματοποιήθηκαν το 1950 με βάση την πείρα από την κατασκευή άλλων υπόγειων σιδηροδρόμων, όπως του Παρισιού, της Ρώμης, της Μαδρίτης και του Μπορένος Άιρες. Πρόκειται, κατά βάση, για μια επιφανειακή κατασκευή λόγω του λοφώδους ανάγλυφου της περιοχής. Το βάθος της σήραγγας, οι εδαφικές συνθήκες κ.α. ποικίλουν εντός ευρέων ορίων, λόγω του ανωτέρου γεγονότος. Θεωρείται φόρτιση για προσωρινή κατασκευή ίση με 3200Kg/m^3 . Σαν πίεση της ελεύθερης διατομής (ελεύθερο όρυγμα κατασκευής) λαμβάνεται το γινόμενο της πλήρους γεωστατικής πίεσης επί έναν από τους παρακάτω μεταβλητούς παράγοντες, οι οποίοι εξαρτώνται από το πηλίκο H / B , όσο και από το είδος του εδάφους.

H/B	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	7.0	10	12	15
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	----	----	----

Κοκκώδη- συνεκτικά εδάφη $\gamma = 1.6t/m^3$	91. 0	83. 0	76. 0	69. 8	59. 3	51. 0	44. 4	34. 6	25. 4	21. 4	17. 2
Υγρή άμμος $\gamma = 1.9t/m^3$	92. 2	85. 2	78. 9	72. 2	63. 5	55. 2	49. 0	38. 9	29. 2	24. 8	20. 1
Διαβρεγμένη άργιλος $\gamma = 2.1t/m^3$	94. 8	89. 8	85. 2	80. 9	73. 2	66. 5	60. 6	51. 0	40. 4	35. 2	29. 1

Τα φορτία της επιφάνειας (οικοδομών, κυκλοφορίας) τίθενται με γωνία 45 μοιρών και λαμβάνονται από τις ακόλουθες τιμές .

Βάθος	t/m^3
H=1	5.0
H=2	4.0
H=3	3.0
H=4	2.0
H=5	1.0
H=6	0.0

Από το ωφέλιμο φορτίο των οχημάτων του υπογείου, καθένα από τα οποία ζυγίζει 40 τόνους, ως και από το βάρος των πλακών των θεμελίων λαμβάνεται ως ανώτατη τιμή της δράσης του θεμελίου η **0.36Kg/cm** και ως ελάχιστη τιμή η **0.13Kg/cm** .

Το ύψος h_p των μαζών του εδάφους, που ενεργούν πάνω στο σήραγγα, λαμβάνεται με διάφορες, εκάστοτε, τιμές ανάλογα της ιδιότητας και του είδους του υπερκείμενου εδάφους .

Ο εκάστοτε συνδυασμός των ανώτατων και ελάχιστων τιμών με την πλευρική πίεση για την πιο δυσμενή περίπτωση και για αμμώδη εδάφη, έχει ως εξής .

Είδος εδάφους		Πάνω από το υπόγειο νερό		Κάτω από το υπόγειο νερό	
		H_{pmin}	H_{pmax}	H_{pmin}	H_{pmax}
Πυκνή άμμος	Αρχική πίεση	0.27 (b+m)	0.60 (b+m)	0.54 (b+m)	1.20 (b+m)
	Τελική πίεση	0.31 (b+m)	0.69 (b+m)	0.62 (b+m)	1.38 (b+m)
Χαλαρή άμμος	Αρχική πίεση	0.47 (b+m)	0.60 (b+m)	0.94 (b+m)	1.20 (b+m)
	Τελική πίεση	0.54 (b+m)	0.69 (b+m)	1.08 (b+m)	1.38 (b+m)

* Οι τιμές των **b** και **m** είναι σε μέτρα (**m**) .

Οι πλευρικές πιέσεις θεωρούνται τραπεζοειδώς διανεμημένες με τιμή που δίνεται από την παρακάτω σχέση .

Λεωνίδας Τζεβελέκας 83

$$p_h = 0.3g(0.5m + h_p)$$

Σε περιοχές που συναντήθηκε βασάλτης, το ύψος της στήλης της αρχικής πίεσης τίθεται ίση με $h_p=0$, εφόσον το πέτρωμα δεν έχει πολλά «χάσματα» ενώ σαν τελική πίεση λαμβάνεται η μεγαλύτερη από τις ακόλουθες τιμές .

$$h_p = 0.5b$$

Εάν αντιθέτως, ο βασάλτης είναι ρηγματωμένος, η $h_p = 0.35(b + m)$ υποτιθέμενη τιμή της αρχικής πίεσης κυμαίνεται μεταξύ των τιμών **0- 0.6 (b + m)**, ενώ εκείνη της τελικής πίεσης μεταξύ των τιμών **0.35 (b + m)** και **1.1 (b + m)**.

Σε αργιλώδη εδάφη η πίεση της οροφής δίδεται από την ακόλουθη σχέση .

$$p_u = H - \frac{2S}{b}$$

όπου, **S** η πλευρική τριβή της στήλης του εδάφους πάνω από την διατομή και η οποία υπολογίζεται από τον εξής τύπο .

$$S = \left(c + I_a * \frac{H}{2} * \tan j \right) * H$$

Σε πλαστικά αργιλώδη εδάφη δρα, επίσης, και πλευρική πίεση . Η τιμή λ_a της πλευρικής πίεσης λαμβάνεται ως **0.7** και στα αργιλώδη εδάφη ως **0.5** .

3.12.4. Κανόνες εύρεσης των φορτίων για οδικές σήραγγες

Κατά την γενική και προκαταρκτική μελέτη μιας σιδηροδρομικής σήραγγας λαμβάνονται υπόψη τα ακόλουθα φορτία και επιδράσεις δυνάμεων .

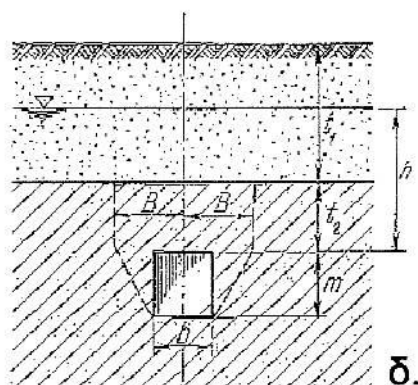
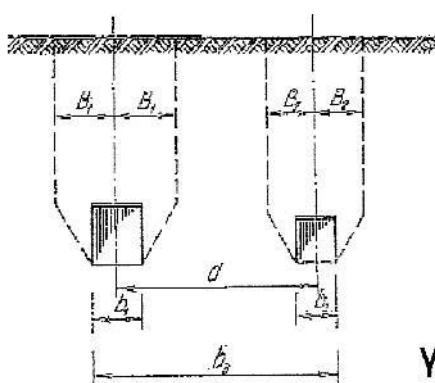
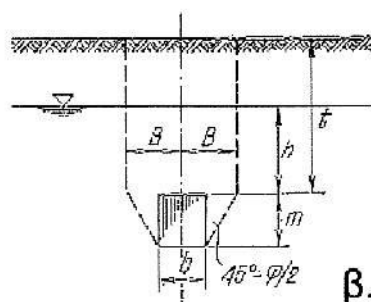
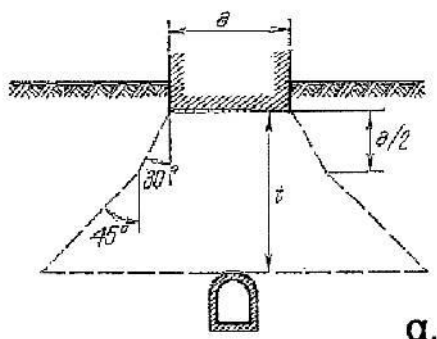
Ø Μόνιμα φορτία και επιδράσεις

1. Πίεση του εδάφους
2. Ίδιον βάρος του τεχνικού έργου
3. Το βάρος από διάφορες κατασκευές και εξοπλισμούς
4. Οι επιδράσεις των μετατοπίσεων (εφόσον μειώνουν την ασφάλεια)
5. Το βάρος του σκυροδέματος

Ø Πιθανώς εμφανιζόμενα φορτία και επιδράσεις

1. Κινητά φορτία (συγκοινωνία, συναθροίσεις ανθρώπων)
2. Διακυμάνσεις θερμοκρασίας (εντός στενών ορίων)
3. Ενασκούμενες επιδράσεις από τα μηχανήματα κατασκευής

Η επίδραση των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας λαμβάνεται υπόψη μόνο σε εξαιρετικές περιπτώσεις .



α :

γ.

δ.

Παραδοχή διανομής των φορτίων επιφάνειας
 β,δ : Υπολογισμός των κάθετων φορτίων
 γ : Ελάχιστη απόσταση μεταξύ γειτονικών σήραγγα

3.12.5. Γενικοί κανόνες εύρεσης των φορτίων και μετρήσεων, για υπόγεια σιδηροδρομικά και οδικά έργα

Οι φορτίσεις που δρουν στα τοιχώματα της σήραγγας καθορίζονται σε συσχετισμό προς το βάθος της σήραγγας, τις γεωλογικές, υδρολογικές και σεισμικές συνθήκες, τις διαστάσεις του κενού χώρου και από τον επιλεγμένο τρόπο κατασκευής της σήραγγας .

Η επένδυση του σήραγγα, υπολογίζεται για τον πιο δυσμενή συνδυασμό όλων των φορτίσεων και δυνάμεων, όπου κατά τον υπολογισμό εξετάζονται τα εξής στοιχεία .

Κύρια φορτία (μόνιμα και εξωτερικές δυνάμεις)

- 1) Το ίδιο βάρος της επένδυσης
- 2) Η κάθετη και οριζόντια πίεση του εδάφους
- 3) Η εξωτερική υδροστατική πίεση του νερού
- 4) Η πίεση από το βάρος των οικοδομημάτων που βρίσκονται πάνω από τη σήραγγα
- 5) Ενδεχόμενα φορτία από την συγκοινωνία μέσα και πάνω από τη σήραγγα

Πρόσθετοι συνδυασμοί φορτίων που μπορεί να συνοδεύουν τα κύρια φορτία

- 1) Επιδράσεις από τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας
- 2) Φορτία από την λειτουργία μηχανημάτων κατά τις εργασίες κατασκευής της σήραγγας
- 3) Εγχύσεις κατά τις εργασίες μορφοποίησης των επενδύσεων
- 4) Πίεση από την χρησιμοποίηση πεπιεσμένου αέρα

Ειδικοί συνδυασμοί φορτίων πέρα των μονίμων και πρόσθετων φορτίων και δυνάμεων, όπως π.χ. σεισμικές δυναμοεπιδράσεις

Οι πύλες της σήραγγας πρέπει να μετρηθούν για την πίεση του εδάφους, το φορτίο του τεχνικού έργου μέχρι και για σεισμικές δυνάμεις . Το μέγεθος της πίεσης του εδάφους, που επιδρά επί της επένδυσης, λαμβάνεται από προηγούμενη εμπειρία από άλλα παρόμοια τεχνικά έργα και υπό παρόμοιες μηχανογεωλογικές συνθήκες καθώς και από τους κανόνες που ακολουθούν .

- Ø Κατά την κατασκευή ξεχωριστών αγωγών, με εξωτερική διάμετρο **5.5 – 6.0** μέτρα και με μια σιδηροτροχιά για κάθε σήραγγα, η δρώσα και ομοιόμορφα κατανεμημένη, επί της επένδυσης, κάθετη πίεση του εδάφους μπορεί να ληφθεί από τον παρακάτω Πίνακα 8.
- Ø Όταν ο υπολογισμός σύμφωνα με τον Πίνακα 8 δώσει τιμές, που υπερβαίνουν το βάρος των πάνω, από το σήραγγα, ευρισκόμενων στρωμάτων, τότε οι υπολογισμοί γίνονται κατά την παράγραφο ν.
- Ø Όταν η αντοχή του πετρώματος στην περιοχή του ορύγματος δεν φτάνει το μήκος της διαμέτρου και όταν υπάρχουν πολύ αδύνατα στρώματα, τότε η φόρτιση υπολογίζεται από την σχέση:

$$p = p_z - \frac{z (p_z - p_o)}{D}$$

όπου, p_o = τιμή του Πίνακα 8 για το έδαφος ορύγμα

αμέσως πάνω από το

p_z = τιμή του Πίνακα 8 για το αμέσως επόμενο ασθενέστερο έδαφος,

Z = η απόσταση μεταξύ κορυφής του ορύγματος και θεμελίου του προηγούμενου στρώματος

D = η διάμετρος του ορύγματος

- Ø Για κατασκευές σήραγγα σε αργιλωδη εδάφη και σε βάθος μεγαλύτερο των **45m**, οι τιμές του Πίνακα 8 πρέπει να πολλαπλασιαστούν με τον παράγοντα $K = H / 45$, όπου H το βάθος του σήραγγα .
- Ø Εάν το σήραγγα που είναι σε αργιλώδες εδάφη δέχεται υπόγειο νερό, τότε οι τιμές του Πίνακα 8 πρέπει να αυξηθούν κατά **30%** .
- Ø Για σήραγγα που κατασκευάζονται σε αργιλωδη εδάφη, το οριζόντιο φορτίο μπορεί να υπολογισθεί από την πίεση του εδάφους με βάση την ακόλουθη σχέση .

$$q = p \tan^2 \left(45 - \frac{j}{2} \right) = p I a (t / m^2)$$

Εάν ισχύουν διαφορετικές συνθήκες από τις προαναφερθείσες, τότε ισχύουν οι παρακάτω κανόνες για την εύρεση του φορτίου .

- ∅ Εάν μπορεί να σχηματισθεί θόλος πάνω από το σήραγγα, τότε η πίεση του εδάφους προσδιορίζεται από την επιφάνεια του θόλου και τις οριακές επιφάνειες ολίσθησης του ακόλουθου σχήματος . Στην περίπτωση αυτή, πρέπει η απόσταση μεταξύ κορυφής του θόλου χαλάρωσης και του θεμελίου του υπερκείμενου ασθενούς στρώματος ή της επιφάνειας του εδάφους, να είναι, τουλάχιστον, ίση προς το ύψος του θόλου αυτού. Εάν δεν πληρούνται οι συνθήκες αυτές, τότε ο υπολογισμός βασίζεται στην πλήρη γεωστατική πίεση . Τα μέτρα του θόλου πίεσης υπολογίζονται από τον τύπο:

όπου, $f = \sigma$ ο συντελεστής αντοχής

$$B = b + 2 m \tan \left(45 - \frac{j}{2} \right)$$

- ∅ Κατά τους κανόνες εύρεσης του φορτίου, η πίεση του εδάφους που επιδρά επί την επένδυση του σήραγγα, μπορεί να θεωρηθεί ως ομοιόμορφα κατανομημένη και υπολογίζεται από:

$$q = g * h_1$$

$$p_x = g (h_1 + 0.50 m) - l_a$$

όπου, $\gamma =$ το φαινόμενο βάρος του εδάφους

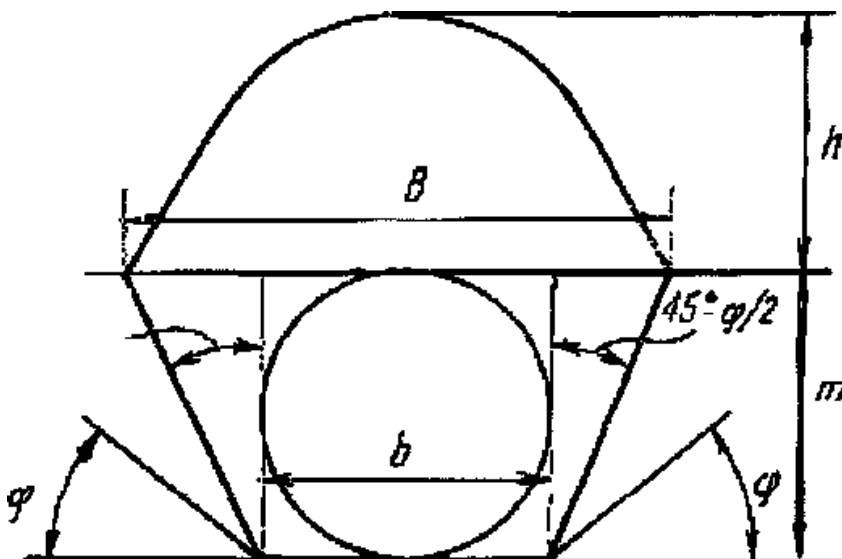
του

- ∅ Η πίεση που δρα μέχρι την επένδυση του σήραγγα σε υδατοκορεσμένα χαλαρά εδάφη, υπολογίζονται σύμφωνα με την πίεση των υγρών .

- ∅ Οι συντελεστές πολλαπλασιασμού των μόνιμων φορτίων και δυναμοεπιδράσεων δύναται να ληφθούν από τους υπολογισμούς των φορτίων, όπως φαίνεται παρακάτω .

$$H = \beta / 2 * f$$

$$B = b + 2 * m * \tan (45 - \varphi/2)$$



Οι τιμές που είναι μεγαλύτερες ή μικρότερες της μονάδος, αναφέρονται σε περιπτώσεις που η δεδομένη φόρτιση αυξάνει ή μειώνει την θεωρητικά αθροιζόμενη δράση Τα φορτία από την κυκλοφορία στην επιφάνεια και μέσα στο σήραγγα λαμβάνονται από τους ανάλογους κανόνες εύρεσης φορτίου .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Μέθοδοι Διάνοιξης Σήραγγας

Με βάση τα γεωλογικά και γεωτεχνικά στοιχεία από έρευνες που έχουν διεξαχθεί στην περιοχή των σηράγγων και τις υφιστάμενες επί τόπου συνθήκες, αποφασίζετε η πλέον κατάλληλη μέθοδος διάνοιξης . Συγκεκριμένα, η εκσκαφή δύναται να γίνει με χρήση εκρηκτικών μέσων, με μηχανικά μέσα ή και συνδυασμό των δύο καθώς και εκσκαφή ολόκληρης της διατομής σε μια φάση ή περισσότερες και με προήγηση σήραγγας πιλότου .

Ο καθορισμός της μεθοδολογίας της εκσκαφής για την γρήγορη και ασφαλή διάνοιξη των σηράγγων βασίζεται στους παρακάτω εμπλεκόμενους παράγοντες .

Στις γεωλογικές και γεωτεχνικές μελέτες .

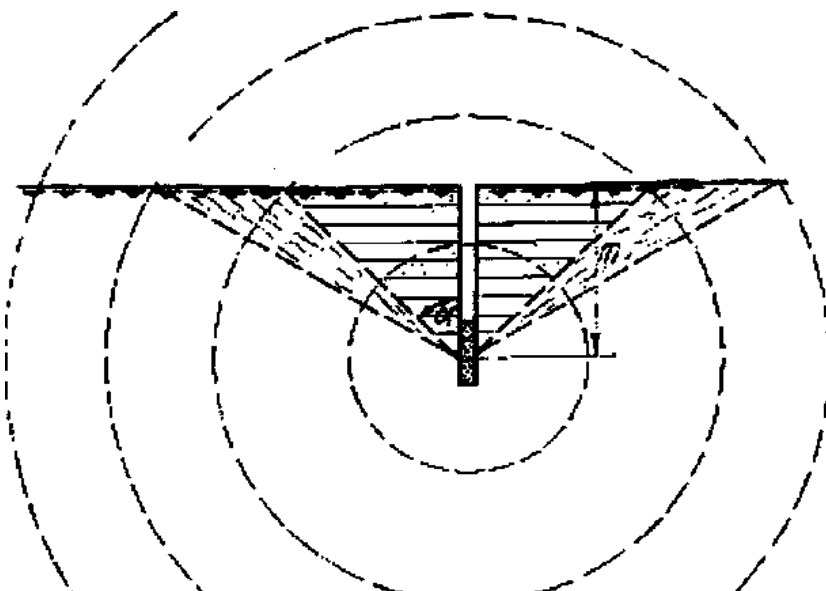
- Ø Στις επί τόπου του έργου επισκέψεις .
- Ø Την εν γένει εμπειρία σε αντίστοιχα έργα σηράγγων .
- Ø Την υπάρχουσα προμελέτη .
- Ø Τα μήκη των σηράγγων, τα οποία είναι σχετικά μικρά .
- Ø Τα μέτρα αντιστήριξης που προκύπτουν από την προμελέτη .
- Ø Την γεωμετρία των συγκεκριμένων οδικών σηράγγων, έτσι ώστε να επιτευχθεί η διάνοιξη με την βέλτιστη ασφάλεια και ταχύτητα .
- Ø Στις πληροφορίες που συγκεντρώνονται από την διάνοιξη των σηράγγων πιλότων, στα στόμια των σηράγγων .



4.1. Μέθοδοι Διάνοιξης Σήραγγας

4.1.1. Η Τεχνική Των Εκρήξεων (**Drill and Blast**)

Η χρησιμοποίηση εκρηκτικών υλών για την διάνοιξη μιας σήραγγας ενεργεί εντός ορισμένης περιοχής με ορισμένη ακτίνα . Ο βαθμός ενέργειας εντός της περιοχής εκρήξεως μειώνεται κατά ζώνες, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα, από την εξωτερική περίμετρο προς την εσωτερική περίμετρο του σχήματος .



- ∅ Ζώνη κατακερματισμού
- ∅ Ζώνη εκσφεντονίσεως
- ∅ Ζώνη καταστροφής
- ∅ Ζώνη διασείσεως (τράνταγμα)

Το μέγεθος της ακτίνας ενεργείας εξαρτάται, εκτός από το είδος και την ποσότητα του εκρηκτικού υλικού και από το είδος του πετρώματος και το φλοιό της γης στην περιοχή που διενεργείται η έκρηξη. Υπό κανονικές συνθήκες η ανατίναξη δημιουργεί ένα κρατήρα, του οποίου οι πλευρικές επιφάνειες έχουν μια γωνία 45° .

Επίσης, από διάφορα πειράματα προκύπτει, πως μόνο το **20%** της εκλυόμενης κατά την έκρηξη ενέργειας χρησιμοποιείται για την χαλάρωση του πετρώματος.

Η εκλογή του βάθους της οπής ανατίναξης και η διάταξη αυτών εξαρτάται θεωρητικά από τους παρακάτω συλλογισμούς. Η εκρηκτική ύλη, η οποία εισάγεται σε βάθος, εκσφενδονίζει το υλικό του πετρώματος από ένα κώνο του οποίου η γραμμή με την κάθετο σχηματίζει γωνία α . Ο ανωτέρω κώνος έχει όγκο που προκύπτει από την ακόλουθη σχέση.

Επειδή, ισχύει $r = u \cdot \tan \alpha$, η ανωτέρω $V = \frac{m}{3} \cdot p \cdot r^2$ σχέση γίνεται ως $V = \frac{p}{3} \cdot u^3 \cdot \tan^2 \alpha$ ακολούθως.

Κατά **Lebrun** παρίσταται, μεταξύ του μεγέθους **L** της γομώσεως του εκρηκτικού και του βάθους της οπής ανατινάξεως, η παρακάτω σχέση.

$$L = c \cdot \frac{m^3}{\cos^3 a}$$

όπου, **c** είναι η σταθερά η οποία εξαρτάται από την αντοχή του πετρώματος και της ιδιότητας του εκρηκτικού υλικού.

Συνεπώς, ο όγκος του κώνου που σχηματίζεται κατά την έκρηξη γίνεται τελικά ως εξής.

$$V = \frac{p}{3} \cdot \frac{L}{c} \cdot \cos^3 a \cdot \tan^2 a$$

Εάν σχηματίζουμε τις ακραίες τιμές της **V** ως προς α έχουμε την παρακάτω σχέση.

$$\frac{dv}{da} = \frac{p}{3} \cdot \frac{L}{c} \cdot (2 \cdot \sin a \cdot \cos^2 a - \sin^3 a)$$

Η τιμή αυτή μηδενίζεται όταν $2 \cos^2 \alpha = \sin^2 \alpha$ και επίσης όταν $\tan \alpha = \sqrt{2}$. Συνεπώς, προκύπτει ότι $\alpha = 54^\circ 44'$.

Έτσι προκύπτει το βάθος της οπής, που αντιστοιχεί στον άριστο κώνο, βάσει της παρακάτω σχέσης.

$$m_o = \frac{4}{7} * \sqrt[3]{\frac{L}{c}}$$

Στην πράξη χρησιμοποιούνται, για τους υπολογισμούς, τιμές του m_o από **70 - 80%** .

Οι εκρηκτικές ύλες υποδιαιρούνται στις ακόλουθες κατηγορίες .

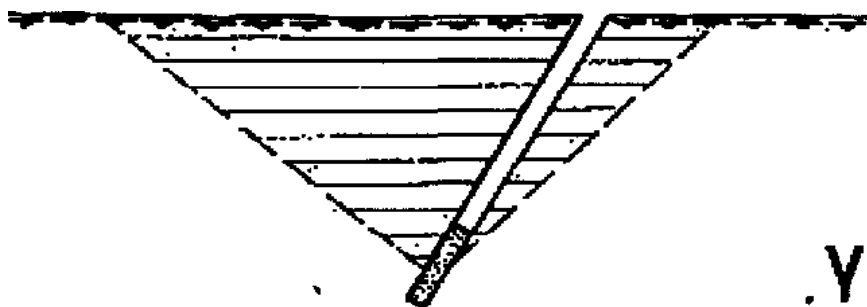
1. Άμεσα και βραδέως ενεργούντα εκρηκτικά υλικά
2. Ακραίως ενεργούντα υλικά
3. Αρχικά εκρηκτικά υλικά, όπως βροντώδης **Hg**, Οξειδίο **Pb**

Η καλή εκτέλεση των εργασιών της ανατινάξεως, που προκαλεί χαλάρωση του πετρώματος και κατατεμαχισμό μεγάλων όγκων, εξαρτάται από τη σωστή διάταξη των οπών και την ορθή διαδοχή των πυροδοτήσεων . Εάν, η απόσταση μεταξύ δύο οπών δεν είναι πολύ μεγάλη τότε η έκρηξη εκσφενδονίζει το μεταξύ αυτών υλικό, όπως παρατηρείται στο σχήμα **1** . Επίσης, λοξές οπές αποδείχθηκαν στην πράξη πιο αποτελεσματικές από τις κάθετες, διότι η δύναμη επεκτάσεως ενεργεί κανονικά στον άξονα των οπών . Επιπρόσθετα, η γωνία των οπών ανέρχεται σε **45°**, όπως φαίνεται και στο σχήμα **2** . Εάν, το εκρηκτικό τοποθετηθεί μεταξύ δύο κάθετων και διαδοχικών ελεύθερων επιφανειών, προκύπτει ένα χωνί εκρήξεως σύμφωνα με το σχήμα **3** . Η ενέργεια της εκρήξεως, σε αυτήν την περίπτωση γίνεται **2.5** φορές μεγαλύτερη, ενώ σε τρεις τέτοιες επιφάνειες γίνεται **3.5** φορές μεγαλύτερη από εκείνης του χωνιού εκρήξεως .



Σχήμα 88β

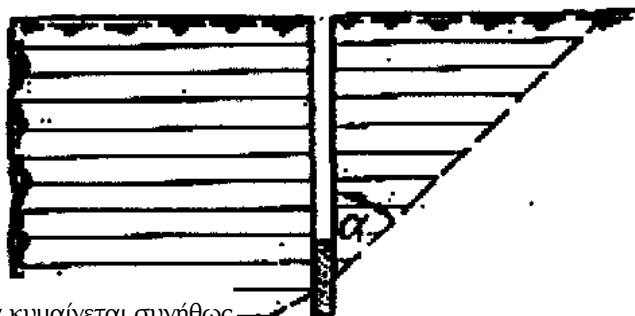
Σχήμα 1



Σχήμα 2

Σχήμα 88γ

Σχήμα 3



διάμετρος των οπών κυμαίνεται συνήθως
ενώ το μήκος τους μεταξύ **1.2** και **3.5m** . Συνήθως δεν συμφέρει να έχουμε μήκη οπών πάνω από **2.5 m** γιατί η

Στην πράξη η
μεταξύ **26** και **40mm**

ετοιμασία μιας οπής 3.6 m απαιτεί τον ίδιο χρόνο με δύο οπές 2.4 m η κάθε μια .

Το βάθος της οπής εξαρτάται και από το είδος του εδάφους . Πρέπει να ληφθεί υπόψη, πως το μήκος της οπής δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το εύρος της σήραγγας καθώς και το γεγονός πως η έκρηξη αρχίζει να ενεργεί 30 - 40 cm (κατά μέσο όρο 1/10 του μήκους της οπής) πάνω από το θεμέλιο της οπής . Για την αύξηση της ενέργειας εκρήξεως συνιστάται να γεμίσουμε την βάση της οπής με εκρηκτικό υλικό ταχείας ενέργειας .

Κατά τον Randzio η οπή πρέπει να έχει μήκος το οποίο προκύπτει από την εξής σχέση : $m = (f - 1) * \alpha + 0.5$ όπου, f είναι η επιφάνεια του στηθαίου της στοάς και α είναι μια σταθερά που εξαρτάται από την διάμετρο της οπής (δ) και για την οποία δίδονται οι παρακάτω τιμές .

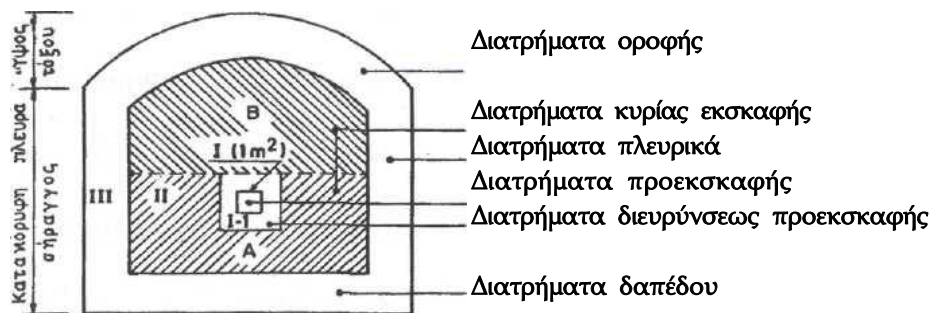
$$\delta = 60 - 80 \text{ mm} \quad \text{για} \quad \alpha = 0.20$$

$$\delta = 45 - 60 \text{ mm} \quad \text{για} \quad \alpha = 0.18$$

$$\delta = 20 - 30 \text{ mm} \quad \text{για} \quad \alpha = 0.10$$

Σύμφωνα με το σχέδιο διατρήσεως, προς διάνοιξη του μέτωπου μιας σήραγγας, διακρίνονται τα ακόλουθα διατρήματα .

- I. Διατρήματα προεκσκαφής (Cut) .
- II. Βοηθητικά διατρήματα (Cut spreader) .
- III. Διατρήματα κυρίας εκσκαφής .
- IV. Διατρήματα περιμετρικά ή λειάνσεως (διαμορφώσεως) .



Κατηγορίες διατρημάτων

4.1.2. Διάνοιξη με συνδυασμό εκρηκτικών υλών - μηχανικών μέσων

Η ως άνω μέθοδος αποσκοπεί στην επίτευξη εκσκαφής που το περίγραμμά της να είναι όσο το δυνατό πιο κανονικό και λείο και να ευρίσκεται, συγχρόνως, πλησιέστερα προς την προβλεπόμενη θεωρητική γραμμή εκσκαφής . Βασίζεται στο συνδυασμό ανατινάξεων και μηχανικών μέσων για την εκτέλεση της εκσκαφής . Η βασική εκσκαφή πραγματοποιείται με λάξευση των παρειών χρησιμοποιώντας κοπτήρες βράχου με αρθρωτή κεφαλή . Συνεπώς εξουδετερώνεται πλήρως ή ελαχιστοποιείται η υπερεκσκαφή που προκαλείται με την συμβατική μέθοδο ανασκαφής (διατρήματα - ανατινάξεις) .

Το κόστος του μηχανικού εξοπλισμού που απαιτείται για την εν λόγω μέθοδο αντισταθμίζεται, σε κάποιο βαθμό, από το κόστος πλήρωσης με σκυρόδεμα ή εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της υπερεκσκαφής καθώς και από τις λοιπές δαπάνες που ενδέχεται να συνεπάγονται οι υπερεκσκαφές (υποστυλώσεις, αποκομιδή μπαζών) .

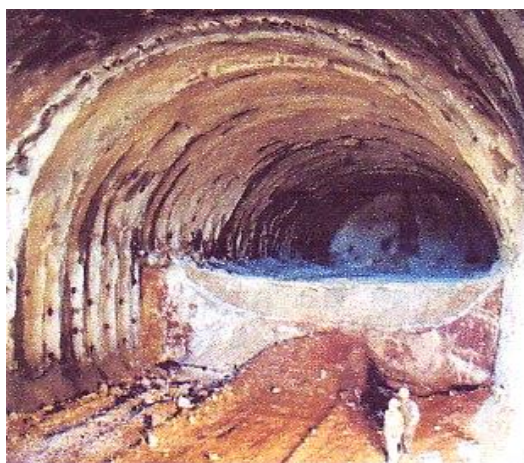
4.2. Φάσεις Εκσκαφής Σήραγγας

Η εκσκαφή της σήραγγας εκτελείται από πάνω προς τα κάτω . Συγκεκριμένα πρώτα σκάβεται το άνω κοίλο τμήμα (**Top Heading**), μετά το κύριο τμήμα (**Bench**) και τέλος το κάτω κοίλο τμήμα (**Invert**) . Έτσι δημιουργείται η πλήρης διατομή της σήραγγας.

Top Heading, είναι το τμήμα που βρίσκεται μπροστά στην κατασκευή της σήραγγας, πέρα από το τελικά επενδυμένο τμήμα της NATM .

Bench, είναι το μεσοδιάστημα μεταξύ στέψης και **invert** στην τμηματική εκσκαφή με τη μέθοδο NATM σε οριζόντια τμηματική εκσκαφή .

Invert, είναι το χαμηλότερο σημείο σε μια τμηματική όρυξη με τη μέθοδο NATM, το τελευταίο κομμάτι που θα εξορυχθεί . Η εκσκαφή του **invert** ξεκινά από το τέλος της σήραγγας προς την αρχή, τοποθετώντας την μόνιμη υποστήριξη .



A' Φάση (Top Heading)

Η πρώτη φάση εκσκαφής (**Top Heading**) μπορεί να εκσκαφθεί και σε περισσότερες υποφάσεις κατά το πλάτος της σήραγγας . Στην περίπτωση αυτή η πρώτη φάση ουσιαστικά αποτελεί σήραγγα - πιλότο - που χρησιμεύει για τη διερεύνηση των συνθηκών που αναμένεται να συναντηθούν κατά τη διάνοιξη της σήραγγας .

Για την όσο το δυνατόν πιο ομαλή διαμόρφωση των παρειών και του θόλου της σήραγγας εφαρμόζεται η μέθοδος ειδικής διάτρησης (**Smooth Blasting**) κατά την οποία πραγματοποιείται η εκσκαφή της τοξωτής άνω ημιδιατομής .

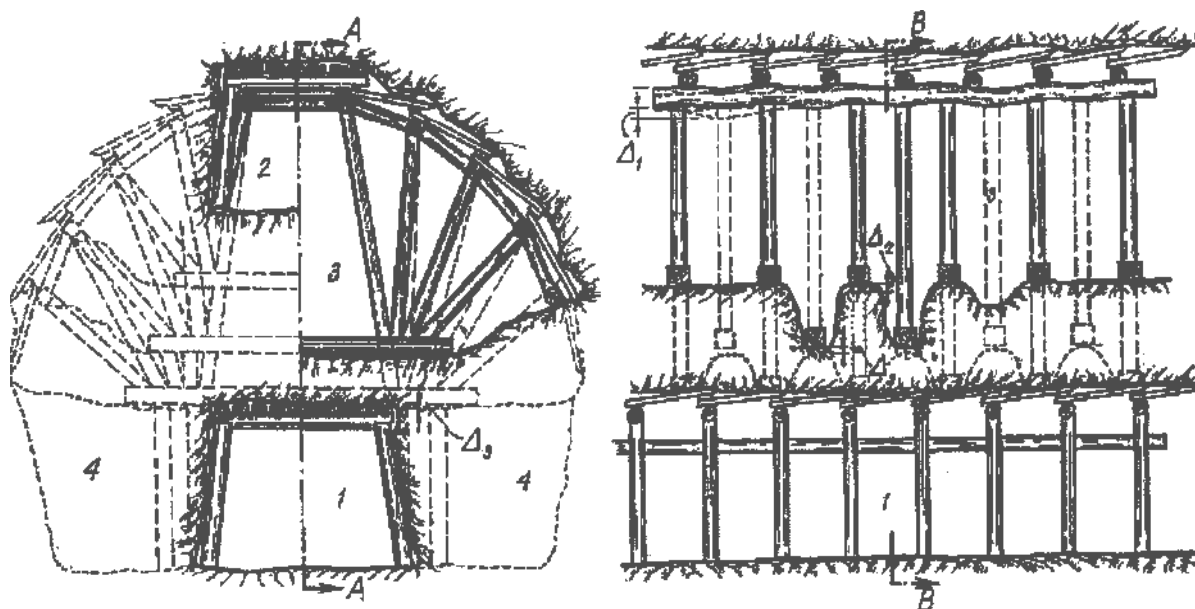


B' Φάση (Bench Heading)

Κατά την φάση αυτή δημιουργούνται συνθήκες όρυξης υπό μορφή βαθμίδος, όπου πραγματοποιείται η εκσκαφή του υπόλοιπου τμήματος, παραλληλόγραμμου σχήματος . Το βήμα προχώρησης είναι ανάλογο της κατηγορίας της βραχώμαζας που απαντάται .

4.3. Διάνοιξη Σήραγγας Σε Πέτρωμα Μέσης Αντοχής Με Βαθμιαία Κατασκευή Της Διατομής Της Σήραγγας

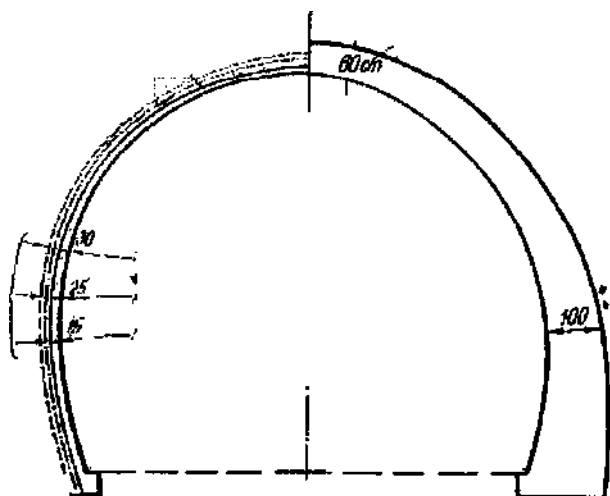
Όσο πιο μικρό είναι το σήραγγα που πρόκειται να κατασκευασθεί τόσο μεγαλύτερη είναι και η ευστάθεια του, για αυτό και παλιά έβρισκε εφαρμογή η τμηματική κατασκευή της διατομής του σήραγγα . Αυτή όμως η μέθοδος συνεπάγεται και μεγάλη αύξηση της απαιτούμενης εργασίας καθώς και περισσότερο χρόνο και μηχανικό εξοπλισμό, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα . Για αυτό σταδιακά, οι μέθοδοι που βασίζονται στην τμηματική κατασκευή της διατομής, παίρνουν στο περιθώριο .

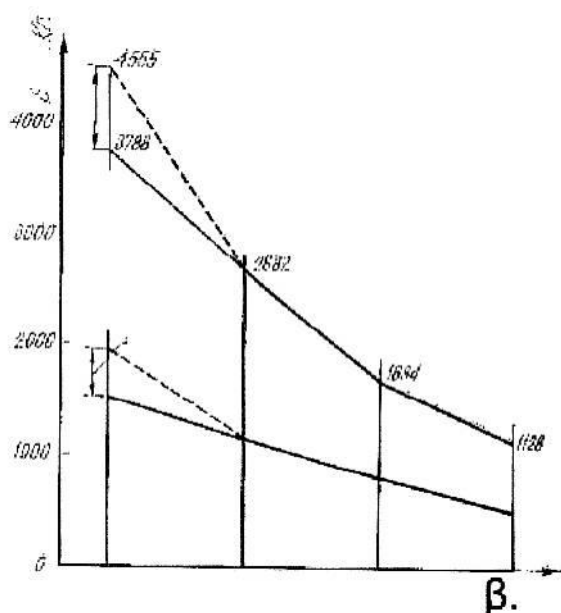


Ο **Rabcewres** συγκρίνει την παλιά (κλασσική) μέθοδο με τις καινούργιες οι οποίες αναφέρονται στην κατασκευή ολόκληρης της διατομής της σήραγγας και απορρέει στο συμπέρασμα πως οι τελευταίες μέθοδοι παρουσιάζουν πολλά περισσότερα τεχνικά πλεονεκτήματα έναντι των κλασσικών μεθόδων . Εάν π.χ. με την κλασσική μέθοδο έχουμε κατά την διάρκεια των εργασιών καταβύθιση της τάξεως των **20 - 80cm** τότε κατά τη μέθοδο της κατασκευής ολόκληρης της διατομής, έχουμε καταβύθιση μόνο μερικά εκατοστά . Ένα άλλο χαρακτηριστικό της σύγχρονης τεχνικής έναντι του κλασσικού τρόπου κατασκευής του σήραγγα, είναι και η δυνατότητα της πίεσεως των κενών χώρων μεταξύ επένδυσης και του εδάφους μέσω εγχύσεων, των οποίων ο ρόλος είναι πολλαπλός .

Ο **Rabcewres** συγκρίνει την παλιά και νέα μέθοδο με τη βοήθεια ενός αριθμητικού παραδείγματος . Το προφίλ του σήραγγα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα και το διάγραμμα κόστους στο αντίστοιχο σχήμα . Με εύρος σήραγγα **9.00 m**, η επιτρεπόμενη τάση της επένδυσης ανέρχεται έναντι πίεσεως του εδάφους σε **50 kg/cm²** και σε **125 kg/cm²** αντίστοιχα .

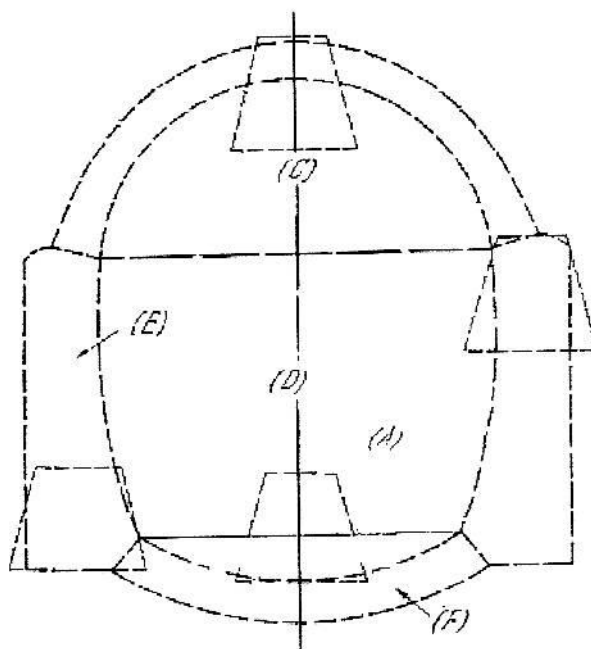
Οι Πίνακες **9** και **10** περιέχουν για ένα έδαφος με ειδικό βάρος $\gamma = 2.5 \text{ t/m}^3$, συγκριτικά διάφορα τεχνικά στοιχεία και το κόστος κατασκευής για τις δύο μεθόδους αντίστοιχως . Στους πίνακες φαίνεται πως η μέθοδος της κατασκευής ολόκληρης της διατομής με μιας είναι δυσκολότερη έναντι της κλασσικής μεθόδου, της τμηματικής κατασκευής .





Το ακόλουθο σχήμα περιλαμβάνει την ονοματολογία των διαφόρων τμημάτων του σήραγγα κατά την κατασκευή με την κλασσική μέθοδο . Επίσης, το προφίλ του σήραγγα διαιρείται στα παρακάτω τρία τμήματα .

- Ø Τον κορυφαίο θόλο
- Ø Τον πυρήνα
- Ø Το θεμέλιο



Στο πρώτο τμήμα, στον κορυφαίο θόλο, υπάρχουν η στοά της οροφής και ο θόλος της κορυφής της σήραγγας . Η κατασκευή ενός σήραγγα διατομής πετάλου τμηματικά μπορεί να γίνει κατά την μέθοδο που φαίνεται στο παρακάτω διαγραμματικό σχήμα . Ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής της τοιχοποιίας, αν δηλαδή είναι σε μία γραμμή ή σε τμήματα, οι μέθοδοι χωρίζονται σε δύο ομάδες. Στο ίδιο σχήμα (α,β,γ,δ,ε,στ) φαίνονται οι διάφοροι μέθοδοι τοιχοποιίας .

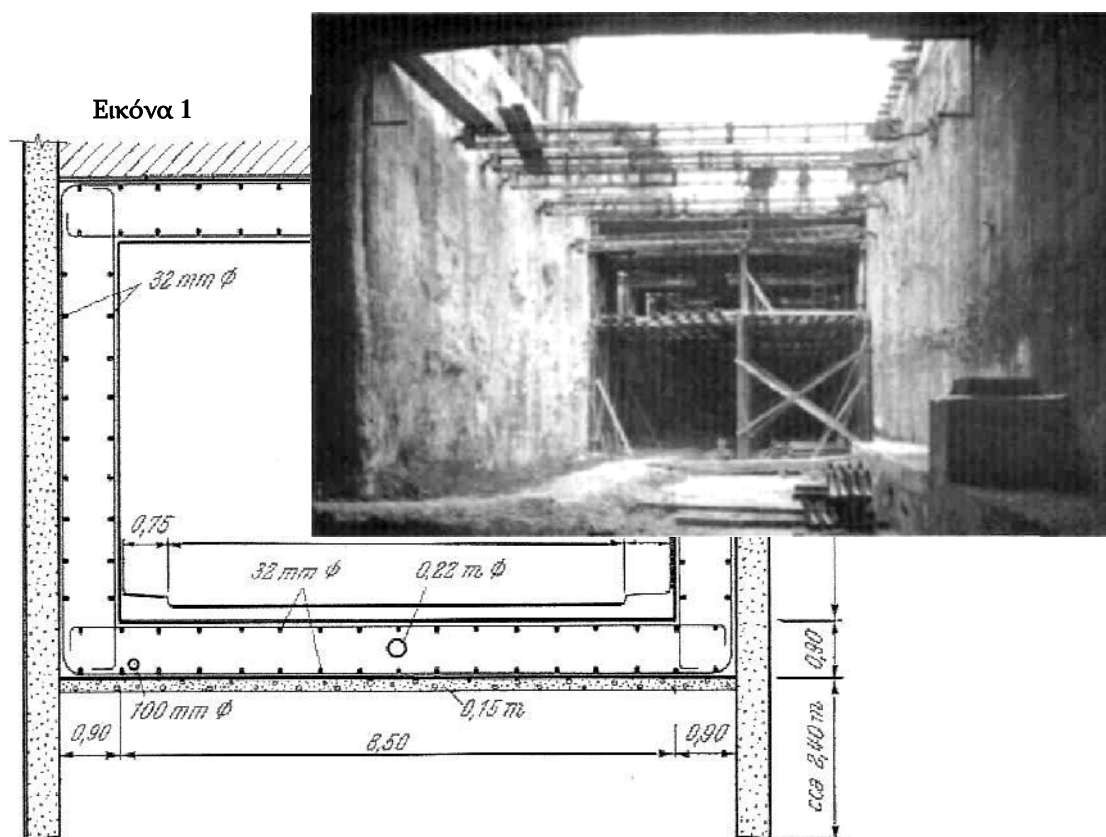
**4.4. Διάνοιξη Σήραγγας Σε Χαλαρά Εδάφη
Με Εκτέλεση Της Διάνοιξης Από Την Επιφάνεια Του Εδάφους
(Ανοικτή Τάφος)**

Χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου τρόπου κατασκευής σηράγγων είναι το μικρό ύψος στο πάνω μέρος του σήραγγα και η μικρή δυνατότητα φόρτισης των στρωμάτων του υπερκείμενου εδάφους . Επίσης, δεν παρουσιάζεται αντίδραση του θόλου πάνω από τον κενό χώρο και υπάρχει ένας κύριος κενός χώρος και στοές για την εξυπηρέτηση των εργασιών εντός αυτής .

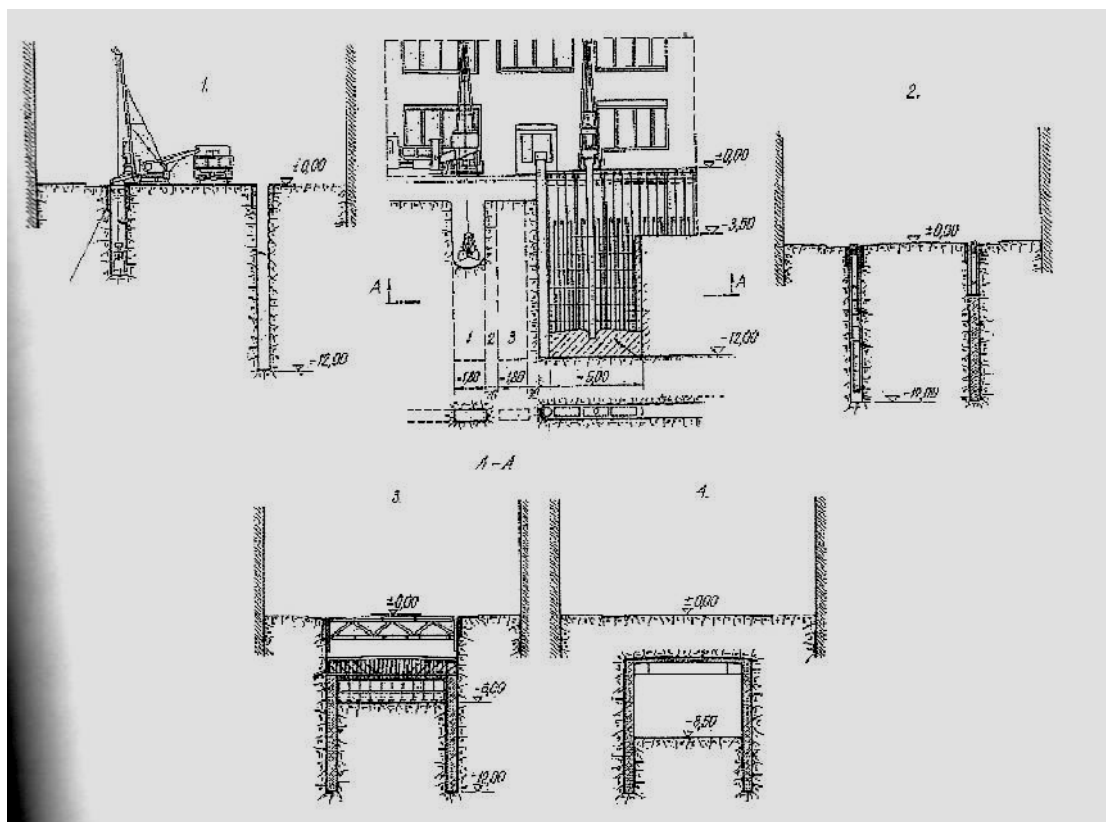
Υπάρχουν δυο τρόποι διάνοιξης της σήραγγας . Ο πιο απλός τρόπος κατασκευής είναι να αφαιρεθεί το έδαφος από την αποστραγγισμένη τάφρο, να φτιάξουμε το υπόγειο έργο και μετά να ξαναβάλουμε το αρχικό έδαφος επάνω . Αυτός ο τρόπος κατασκευής διαφέρει από την κατασκευή σε ανοικτή τάφρο μόνο όσον αφορά στο σκοπό κατασκευής .

Παραπομπή στην υπόγεια σιδηροδρομική σήραγγα της Βουδαπέστης (1895)

Στην συγκεκριμένη περίπτωση διάνοιξης σήραγγας, η κυκλοφορία στράφηκε σε παράλληλους δρόμους όπως διαφείνεται και στην παρακάτω εικόνα . Παραλλαγή αυτής της μεθόδου κατασκευής, δηλαδή διάνοιξη σε ανοικτή τάφρο, αποτελεί η δημιουργία δυο τοίχων από μπετονίτη μεταξύ των οποίων κατασκευάζεται το έργο, εικόνα 1, όπως για παράδειγμα συνέβη στο Παρκ-Λειν του Λονδίνου, για την κατασκευή της διατομής μιας υπόγειας διαβάσεως, εικόνα 2 . Οι τοίχοι αυτοί μπορεί να χρησιμοποιηθούν και σαν πλευρικοί τοίχοι, μόνιμοι του έργου, όπως φαίνεται στην εικόνα 3 .

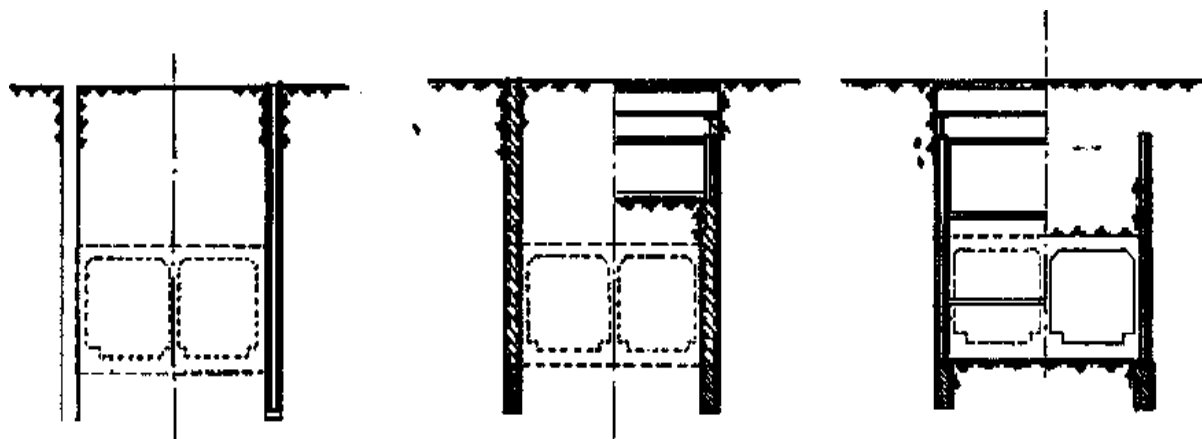


Εικόνα 2



Εικόνα 3

Ένα άλλο παράδειγμα κατασκευής έργων, που βρίσκονται σχετικά σε μεγάλο βάθος κάτω από σχετικά στενούς δρόμους, χωρίς να βλάπτεται η κυκλοφορία, είναι η κατασκευή μερικών τμημάτων του υπόγειου του Τορόντο, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα . Η μέθοδος προβλέπει την λήψη ειδικών μέτρων για την διατήρηση της κυκλοφορίας .



Μια γενικά, πιο συνηθισμένη μέθοδος είναι να διατηρείται η κυκλοφορία μόνο σε ορισμένα ίχνη του δρόμου και να κατευθύνεται η κυκλοφορία και το μεγαλύτερο μέρος της, σε πλευρικές οδούς . Το υπόγειο έργο κατασκευάζεται κατά λωρίδες ενώ η προσωρινή γέφυρα μεταφέρεται πάντοτε πάνω από το κατασκευασμένο τμήμα . Αυτό έγινε κατά την κατασκευή των δύο στοών στη (στάση) Αστόρια, όπως βλέπουμε στο ακόλουθο σχήμα .



Κατά
κατασκευής
σήραγγα,
βλάπτεται η

τον τρόπο
υπόγειου
χωρίς να
κυκλοφορία

των οχημάτων, από την επιφάνεια του εδάφους διανοίγονται δύο στενές οπές σε αρκετό βάθος, στις οποίες θεμελιώνονται τα ακρόβαθρα . Έπειτα, σκάβεται η θέση για τη σκεπή την οποία και τοποθετούμε επί των πλευρικών τοίχων .

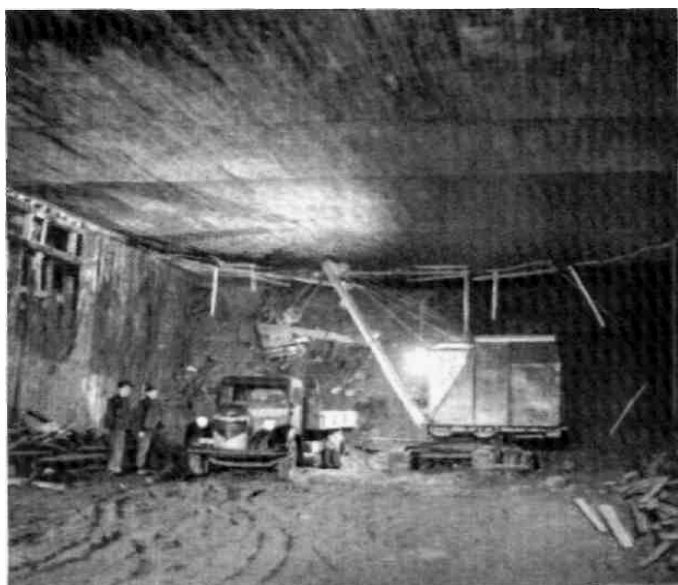
Μετά τη σταθεροποίηση της, ξανακατασκευάζεται και το κομμάτι του δρόμου και αποκαθίσταται η συγκοινωνία στο τμήμα αυτό του δρόμου .

Η απομάκρυνση των χωμάτων γίνεται υπό την προστασία του πλαισίου σχήματος **U** που έχει ήδη κατασκευασθεί, όπως φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα .

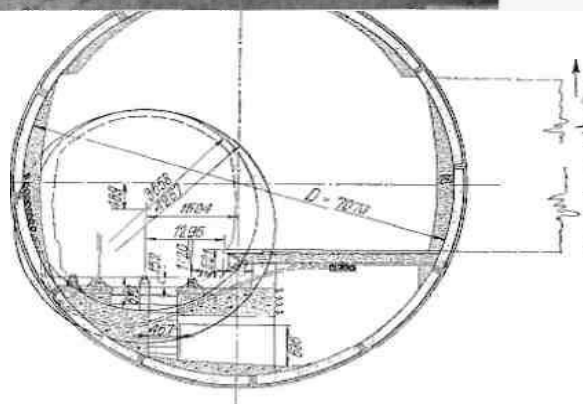
Στην περίπτωση διάνοιξης ενός υπόγειου σιδηροδρομικού σταθμού, μεγάλης κυκλοφορίας, ο τρόπος με τον οποίο θα διανοιχθεί εξαρτάται κυρίως από το εάν πρόκειται να κατασκευασθεί αμέσως κάτω από το κατάστρωμα της υφιστάμενης οδού ή πολύ πιο βαθιά από αυτό . Συνήθως, τα υπόγεια αυτά έργα, όπου το κατάστρωμα τους θα κατασκευασθεί επί ανοικτής τάφρου, βρίσκονται σε αρκετά μεγάλο βάθος από την επιφάνεια της υπάρχουσας οδού .



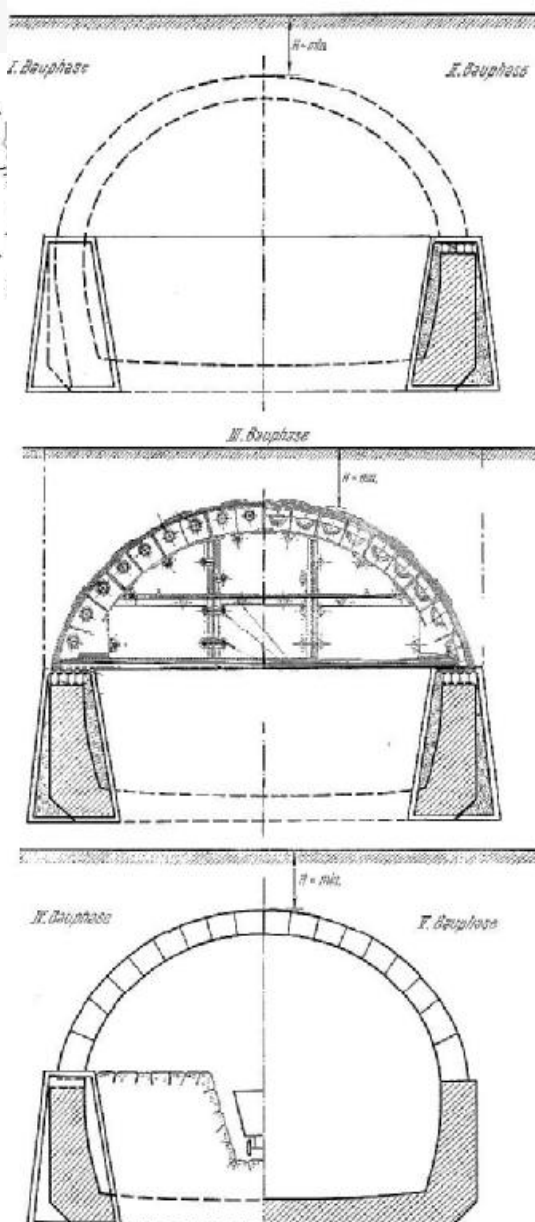
Στην περίπτωση που η υπόγεια σιδηροδρομική σήραγγα θα κατασκευασθεί αμέσως κάτω από το κατάστρωμα της οδού, τότε ενδείκνυται η διάνοιξη ανοικτής τάφρου . Αντιθέτως, στις περιπτώσεις κατασκευής υπόγειων έργων κατά τις οποίες συντρέχουν ασυνήθεις εδαφικές συνθήκες, δύναται το εν λόγω έργο να κατασκευασθεί υπό το κατάστρωμα της οδού, όπως φαίνεται στην διπλανή εικόνα .



Ανάλογη περίπτωση υπόγειου έργου που κατασκευάστηκε σε αρκετά μεγάλο βάθος, κάτω από την υφιστάμενη επιφάνεια του εδάφους, συνέβη στην περίπτωση του υπόγειου σιδηροδρομικού σταθμού του Λονδίνου .



Λεπτομέρειες της κατασκευή του υπόγειου σιδηροδρομικού σταθμού του Λονδίνου



Στο Παρίσι και στη Ρώμη όπου δεν ήταν εφικτή η διάνοιξη να γίνει επί ανοικτής τάφρου, φτιάχτηκαν πρώτα οι τοίχοι και μετά ο θόλος της κορυφής έγινε σχήματος τμήματος τόξου, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα .

Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ο 5

Προσδιορισμός Εσωτερικών Κατασκευαστικών Στοιχείων Της Σήραγγας

5.1. Υποστήριξη Της Διανοιγόμενης Σήραγγας

Με τον όρο **υποστήριξη** γίνεται αναφορά σε όλα τα μέτρα εκείνα που πρέπει να ληφθούν κατά τη διάρκεια εκσκαφής ή αμέσως μετά από αυτή, ενός υπόγειου ανοίγματος και τα οποία θα συντελέσουν στην ασφαλή διέλευση μέσα από αυτό αλλά και στη διατήρηση του σχήματος του . Επιπλέον, τα μέτρα άμεσης υποστήριξης αποβλέπουν στην ικανότητα ανάληψης φορτίου από την περιβάλλουσα την εκσκαφή βραχόμαζα προς αποφυγή πιθανής κατάρρευσης της βραχόμαζας λόγω βαρύτητας ή την εκδήλωση εκτεταμένων παραμορφώσεων της βραχόμαζας, που δεν είναι αποδεκτές, πριν ολοκληρωθεί η κατασκευή της τελικής επένδυσης . Ακόμα, προστατεύουν από κινδύνους καταστροφών τις κατασκευές, εξασφαλίζουν το εργαζόμενο προσωπικό από τον κίνδυνο ατυχημάτων γενικά και στοχεύουν στην πρόκληση της ελάχιστης δυνατής διατάραξης επί της περιμέτρου της διάνοιξης .

Ο δε όρος **αντιστήριξη** περιλαμβάνει φορείς που αναλαμβάνουν και οριζόντια φορτία ή ωθήσεις πυθμένα, με γενικότερη αναφορά του όρου στην σταθεροποίηση του πετρώματος μέσω καθοδήγησης της ανακατανομής των τάσεων μέσα στο πέτρωμα και με την αύξηση της δυνατότητας του να αναλαμβάνει φορτίο .

Οι όροι **προενίσχυση** , **προϋποστήριξη** υποδηλώνουν τη δράση των μέτρων πριν ακόμη πραγματοποιηθεί η εκσκαφή στο χώρο δράσης τους . Συνεπώς, η προενίσχυση τοποθετείται όταν είτε είναι αδύνατο να προσφέρουμε την απαραίτητη υποστήριξη αρκετά γρήγορα είτε θέλουμε να μειώσουμε τις μετακινήσεις στο ελάχιστο . Η μεγαλύτερη χρήση της προενίσχυσης γίνεται κατά την εξόρυξη με την μέθοδο της κοπής και γόμωσης (**Drill & Blast**) . Εφόσον υπάρχει προσπέλαση δυνάμεθα να προενισχύσουμε την βραχόμαζα πριν αρχίσουμε την εκσκαφή .

Η προενίσχυση επιτυγχάνεται συνήθως με ράβδους ή καλώδια πλήρους συνάφειας τα οποία δεν προεντείνονται, δηλαδή λειτουργούν παθητικά . Η προενίσχυση αυτή επιτρέπει την ελεγχόμενη παραμόρφωση του πετρώματος και την ενεργοποίηση της αντοχής του, εμποδίζει δε την διόγκωση και χαλάρωση του πετρώματος .

Δυνατότητα ανάληψης σημαντικών θλιπτικών εφαπτομενικών τάσεων στο χώρο πάνω από το θόλο λόγω της πλευρικής παρεμπόδισης που παρέχουν οι ράβδοι

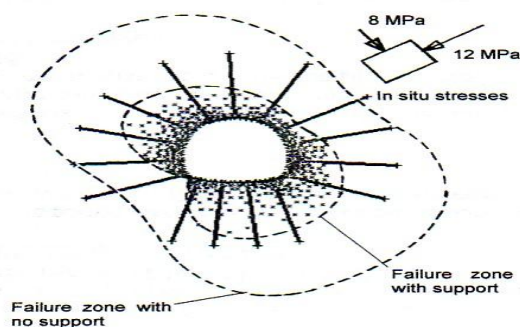
Σε κάποιες περιπτώσεις χρησιμοποιούμε οπλισμό πέραν του άμεσα αναγκαίου ο οποίος θα αναλάβει φορτίο σε μελλοντικό στάδιο . Η αποτελεσματικότητα αυτού του οπλισμού εξαρτάται από την συνάφεια μεταξύ του χάλυβα και του κονιάματος, και μεταξύ του κονιάματος και του βράχου . Οι δε τένοντες που χρησιμοποιούνται για την στερέωση της οροφής είναι κατασκευασμένοι από σύρματα χάλυβα υψηλής αντοχής, ράβδους οπλισμού ή καλώδια . Οι τένοντες γενικά τοποθετούνται κάθετα στην επιφάνεια εκσκαφής, εφόσον όμως στοχεύουν στη σταθεροποίηση μίας κεκλιμένης ασυνέχειας πρέπει να τοποθετούνται με μία κλίση $20^\circ \div 40^\circ$ ως προς αυτή .

Η στήριξη και η ενίσχυση των πετρωμάτων είναι κάποια από τα βασικά μέτρα σταθεροποίησης των υπόγειων ανοιγμάτων . Η επίτευξη της όσο το δυνατόν αποτελεσματικής στήριξης δύναται να υποβοηθηθεί με κατάλληλη επιλογή του μεγέθους, του σχήματος και της διεύθυνσης της εκσκαφής, της αλληλουχίας των

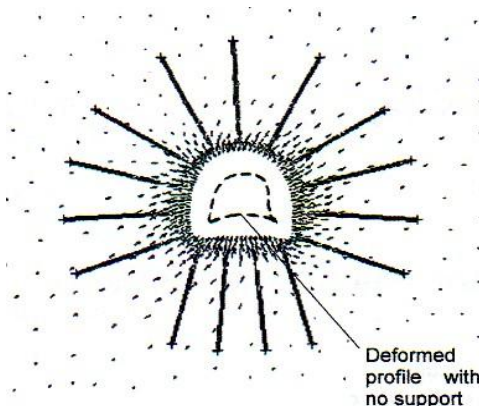
φάσεων εξόρυξης και τις εφαρμοζόμενες μεθόδους των ανατινάξεων .

Έως και πριν σαράντα χρόνια ο τρόπος δράσης της στήριξης ενός υπόγειου ανοίγματος θεωρείτο απλουστευτικά ως η υποστήριξη του υπερκείμενου χαλαρωμένου πετρώματος έναντι των δυνάμεων της βαρύτητας . Η θεώρηση της αλληλεπίδρασης πετρώματος – υποστήριξης αναπτύχθηκε το **1960** . Βασικό στοιχείο της σύλληψης αποτελεί η δυνατότητα χρησιμοποίησης της παραμένουσας αντοχής του πετρώματος, μετά τη διαρροή του, επί ωφέλειας της οικονομικής εκτέλεσης του έργου . Κατά επέκταση, η υποστήριξη θα είχε βασικότερο σκοπό τώρα τη δημιουργία συνθηκών περιορισμού και μικρότερο αυτόν της ανάληψης των κλασικών φορτίων υποστήριξης από αυτήν .

Οι σύγχρονες τεχνικές σταθεροποίησης των πετρωμάτων προσπαθούν να μεταφέρουν όσο το δυνατόν περισσότερο φορτίο μέσα από το πέτρωμα . Για το λόγο αυτό δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στη διατήρηση της αντοχής του πετρώματος και στην τριαξονικότητα της θλιπτικής του κατάστασης . Επομένως, ο κίνδυνος αστοχίας της κατασκευής στις σύγχρονες διανοίξεις δε βρίσκεται πλέον μόνο στις καταπτώσεις της οροφής αλλά και στην εισβολή του μετώπου, στις συγκλίσεις των πλευρών και στην ανύψωση του δαπέδου .



Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης περί αστοχίας βραχόμαζας

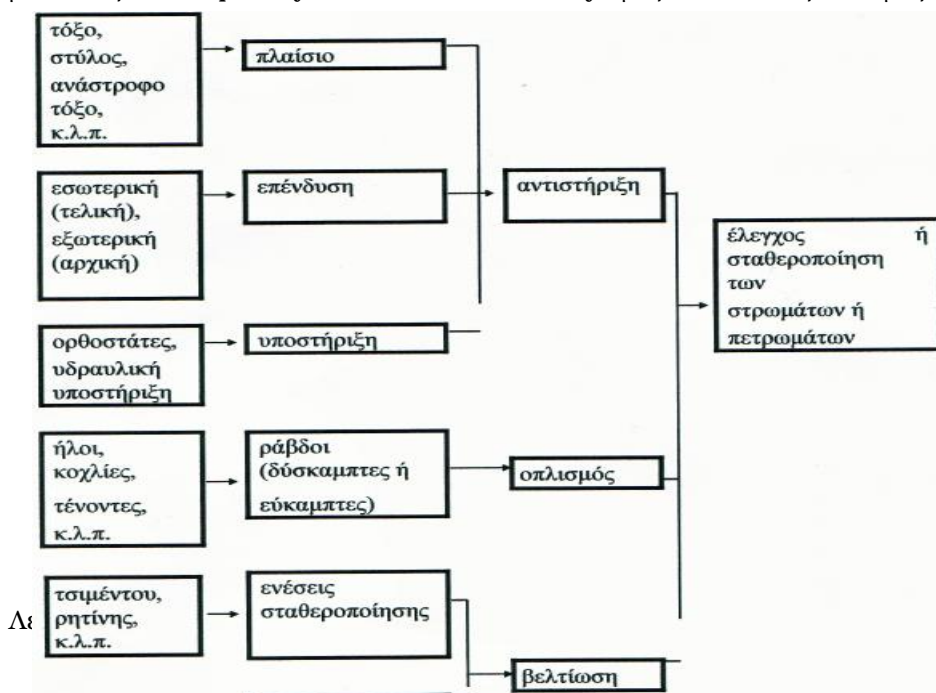


Εξωτερικ
 ά διακρίνεται η ζώνη αστοχίας χωρίς κανένα μέτρο υποστήριξης ενώ εσωτερικά η αντίστοιχη ζώνη αστοχίας με τοποθετημένα μέτρα υποστήριξης

Παραμορφωμένο προφίλ της βραχόμαζας χωρίς κανένα μέτρο υποστήριξης

Ως μέτρα σταθεροποίησης αναφέρονται τα συνδυασμένα μέτρα αντιστήριξης και σπλισμού του πετρώματος . Τα **μέτρα σταθεροποίησης** συχνά **διακρίνονται** σε προσωρινά (**temporary**) και σε μόνιμα (**permanent**) . Ως προσωρινή λειτουργία θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ότι έχουν τα χωρίς αντιδιαβρωτική προστασία αγκύρια . Οικονομικοί λόγοι και σύγχρονες δυνατότητες επιβάλλουν όλο και περισσότερο τη μόνιμη λειτουργία του συνόλου όλων των μέτρων σταθεροποίησης . Σήμερα, η σημαντικότερη διάκριση είναι μεταξύ αρχικών (**primary**) και τελικών (**secondary**) μέτρων . Στα αρχικά μέτρα συχνά περιλαμβάνεται η

εξωτερική επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ενώ στα τελικά μέτρα η εσωτερική επένδυση από έγχυτο σκυρόδεμα .



Υποσύνολα των μέτρων, φορέων και υλικών

σταθεροποίησης των πετρωμάτων

Παρακάτω αναφέρονται κάποια από τα **μέτρα υποστήριξης** που δύναται να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή της σήραγγας, ανάλογα με τον τύπο διατομή αυτής, την κατηγορία του πετρώματος και τις λοιπές τοπικές συνθήκες .

- Ø Χαλύβδινα πλαίσια .
- Ø Μεταλλικά δικτυωτά πλαίσια .
- Ø Ηλώσεις και απλά βλήτρα βράχου .
- Ø Μεταλλικό πλέγμα ή γαλβανισμένο συρματόπλεγμα .
- Ø Προενίσχυση πετρώματος με ενέσεις σταθεροποίησης .
- Ø Στοιχεία έγχυτου ή προκατασκευασμένου σκυροδέματος .
- Ø Μεταλλικά ελάσματα, επίπεδα ή πτυχωτά, διάτρητα ή μη .
- Ø Προτοποθετούμενα ελάσματα ή ράβδοι ή δοκοί προπορείας .
- Ø Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, ινοπλισμένο με χαλύβδινες ίνες ή μη ινοπλισμένο .

5.1.1. Προήγηση Των Στοιχείων Της Άμεσης Υποστήριξης

Στις περιπτώσεις κατηγοριών ασθενών πετρωμάτων, που παρουσιάζουν μικρό χρόνο αυτοϋποστήριξης, απαιτείται πολλές φορές, η ενίσχυση του θόλου της εκσκαφής με ορισμένα συστήματα που προχωρούν εμπρός από την κυρίως διάνοιξη, όπως είναι τα ακόλουθα .

Ø Προήγηση μεταλλικών λαμαρινών

Αυτό το σύστημα εφαρμόζεται σε μέτριας συνεκτικότητας πετρώματα, όπου γίνεται χρήση μεταλλικών πλαισίων . Μετά την τοποθέτηση του τελευταίου πλαισίου, κατά την έναρξη της επόμενης φάσης εκσκαφής, σκάπτεται προσεκτικά με χειροπίστολο, περιμετρικό αυλάκι μέσα στη βραχώμαζα, στο οποίο και σφηνώνονται οι λαμαρίνες προπορείας . Προς την πλευρά του πλαισίου, που έχει ήδη εγκατασταθεί, έχουν περαστεί πάνω από το εξωρράχιο του και έτσι λειτουργούν σαν ένα στέγαστρο, που προστατεύει τους εργαζόμενους στις επόμενες φάσεις της διάνοιξης .

Ø Χαλύβδινοι δοκοί προπορείας (Forepolling)

Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει τη χρήση μεταλλικών δοκών προπορείας, οι οποίοι μπορεί να είναι σιδηροσωλήνες χωρίς ραφή (**tubo**) ή χαλύβδινες δοκοί διαφόρων διατομών. Τοποθετούνται είτε σε οπές που διανοίγονται αμέσως πριν από την εκσκαφή, είτε με ώθηση με μηχανικά μέσα . Οι εν λόγω οπές διανοίγονται με διατρητικό μηχάνημα **Jumbo** . Η διάταξη που ακολουθούν σχηματίζει μια κωνοειδή επιφάνεια, υπό την προστασία της οποίας γίνονται αρκετά βήματα προσχώρησης της εκσκαφής της σήραγγα με ασφάλεια . Πριν εξαντληθεί το μήκος της «ομπρέλας», αρχίζει να τοποθετείται η επόμενη «ομπρέλα» και έτσι οι εργασίες στη σήραγγα εκτελούνται από την συνεχή προστασία της «ομπρέλας» .

Κατά τη διάνοιξη σηράγγων σε εδάφη με προβλήματα αστάθειας, εφαρμόζεται η τεχνική της τοποθέτησης μεταλλικών δοκών προπορείας για την υποστήριξη του μετώπου και του άσκαπτου μέρους ώστε η εκσκαφή του βήματος προσχώρησης να γίνεται υπό ασφαλείς συνθήκες . Η λειτουργία των δοκών

προπορείας βασίζεται στην ενίσχυση και συγκράτηση του εδάφους έναντι καταπτώσεων και λειτουργία τόξου μεταξύ των δοκών λόγω της αυξημένης ακαμψίας .

Η τοποθέτηση δοκών προπορείας θεωρείται ως το πλέον ενδεδειγμένο άμεσο μέτρο προστασίας της οροφής της σήραγγας έναντι καταπτώσεων και δημιουργίας θόλου, όπου είτε λόγω του χαμηλού πάχους υπερκειμένων, είτε των υψηλών τιμών του εντακτικού πεδίου, είτε λόγω της φύσης του εδάφους και των διαστάσεων της σήραγγας, δύναται να επεκταθεί σε μεγάλο ύψος . Λαμβάνοντας υπόψη τη φύση του γεωλογικού σχηματισμού που αναπτύσσεται στη συγκεκριμένη περιοχή του έργου δύναται με ασφάλεια να θεωρηθεί ότι η ενδιάμεση βραχόμαζα μεταξύ των δοκών προπορείας και των πλαισίων θα λειτουργεί ως πρακτικά άκαμπτο παρέμβυσμα .

Οι μεταλλικοί αυτοί σωλήνες έχουν την ιδιότητα να δένουν μεταξύ τους όγκους βραχόμαζας, που προκύπτουν κατά την εκσκαφή, σχηματίζοντας έναν κλούρο κώνο, που βελτιώνει τα χαρακτηριστικά αντοχής του εδάφους περιμετρικά της περιοχής που θα εκσκαφθεί .

Οι δοκοί προπορείας τοποθετούνται σε διάταξη που να σχηματίζεται μια κωνοειδής επιφάνεια, υπό την προστασία της οποίας γίνονται αρκετά βήματα προχώρησης με ασφάλεια . Συγκεκριμένα, τοποθετούνται κατά τις γενέτειρες κωλουροκωνικής επιφάνειας με άξονα παράλληλο προς τον άξονα της σήραγγας . Πριν εξαντληθεί το μήκος της «ομπρέλας» κατά 2 βήματα προχώρησης, αρχίζει η τοποθέτηση της επόμενης «ομπρέλας». Έτσι οι εργασίες στη σήραγγα εκτελούνται υπό τη συνεχή προστασία της «ομπρέλας» . Οι ομπρέλες των δοκών προπορείας απέχουν μεταξύ τους κατά **8.0 m** ώστε η προηγούμενη να υπέρκειται της επόμενης επί μήκους περίπου **4.0 m** .

Η διαδικασία της μεθόδου περιλαμβάνει τη διάτρηση και έπειτα εγκατάσταση μεταλλικών σωλήνων στο έδαφος κατά μήκος της εξωτερικής περιμέτρου του τόξου της σήραγγας . Μετά τη διάτρηση, οι σωλήνες τοποθετούνται και σκυροδετούνται με τσιμεντένεμα το οποίο διεισδύει μέσω οπών που υπάρχουν στα τοιχώματα των σωλήνων προς το έδαφος, σχηματίζοντας έτσι ένα κάλυμμα στην περιφέρεια της σήραγγας .

Ακόμα, πρέπει να εξασφαλίζεται η ικανοποιητική έδραση των δοκών και στις δύο πλευρές στήριξης . Το άκρο των δοκών προπορείας προς το μέτωπο του στομίου πρέπει να εδράζεται επί μεταλλικών πλαισίων τα οποία τοποθετούνται σε αξονικές αποστάσεις **1.0 m** ενώ το άκρο τους προς το εσωτερικό της σήραγγας πρέπει κάθε φορά να είναι επαρκώς εμπηγμένο εντός της βραχόμαζας ώστε να αποφευχθεί η φόρτιση των δοκών προπορείας με μηχανισμό προβόλου .

Ø Προενίσχυση πετρώματος

Η εργασία αυτή εκτελείται, ύστερα από τις εκτιμήσεις της γεωτεχνικής μελέτης, κυρίως με

τισμεντενέσεις σταθεροποίησης του πετρώματος καθώς και χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε κάθε τμήμα της υπό διάνοιξης διατομής της σήραγγας .



5.1.2. Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα ↔ Αγκύρια Βράχου

Για όλες τις κατηγορίες πετρωμάτων, βασικά μέτρα άμεσης υποστήριξης αποτελούν το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, οι ήλοι/αγκύρια βράχου καθώς και τα απλά βλήτρα βράχου .

Στην περιοχή του μετώπου, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα τοποθετείται αμέσως μετά την εκσκαφή, πολλές φορές κατά την διάρκεια της εκσκαφής και πάντως συγχρόνως με την αποκομιδή των προϊόντων της εκσκαφής, σε μια λεπτή στρώση ενδεικτικού πάχους $3 \div 5 \text{ cm}$. Η άμεση τοποθέτηση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος έχει ως απώτερο στόχο να περιορίσει τις μετακινήσεις της βραχώμαζας και να επιμηκύνει το χρόνο αυτούποστήριξης του πετρώματος μετά την εκσκαφή .

Παράλληλα με την πρώτη στρώση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος τοποθετούνται, σε χαρακτηριστικές θέσεις του μετώπου, αγκύρια βράχου σε μικρό αριθμό έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η συνοχή της διατομής .

Μετά την ολοκλήρωση της απομάκρυνσης των προϊόντων της εκσκαφής, ουσιαστικά αρχίζει η φάση λήψης της πλήρης σειράς των μέτρων άμεσης υποστήριξης, που χρονικά δεν πρέπει να διαφέρει από την προηγούμενη, και είναι η στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος μη ινοπλισμένου / ινοπλισμένου με χαλύβδινες ίνες ή και οπλισμένου με μεταλλικό πλέγμα και η συμπλήρωση του αριθμού των αγκυρίων που προβλέπεται . Με αυτόν τον τρόπο ολοκληρώνεται η κατασκευή των μέτρων άμεσης υποστήριξης που προβλέπονται από την εγκεκριμένη μελέτη, μέσα σε ελάχιστο χρονικό διάστημα από την εκσκαφή .

5.1.3. Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα ↔ Μεταλλικά Πλαίσια

Στην περίπτωση που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν μεταλλικά πλαίσια αμέσως μετά την εκσκαφή, τοποθετείται στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος, ινοπλισμένου με χαλύβδινες ίνες ή μη ινοπλισμένου, ενδεικτικού πάχους $3 \div 5 \text{ cm}$ για να προλάβει την έντονη αποτόνωση της βραχώμαζας .

Αμέσως μετά ακολουθεί η τοποθέτηση του χαλύβδινου πλαισίου το οποίο πρέπει να σφηνώνεται στην επιφάνεια της πρώτης ($1_{\eta\varsigma}$) στρώσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος είτε με προκατασκευασμένους τάκους από σκυρόδεμα, είτε με μεταλλικές σφήνες έτσι ώστε να αποφεύγεται κάθε σοβαρή μετακίνηση της βραχώμαζας .

Κατά τη διάρκεια σφήνωσης του χαλύβδινου πλαισίου τοποθετείται και το μεταλλικό πλέγμα ώστε

έπειτα να είναι εύκολη η τοποθέτηση της οριστικής στρώσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος .

Οι εργασίες που απομένουν για την δεύτερη (2^η) φάση είναι η συμπλήρωση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στο στατικό του πάχος και η καλή σφήνωση του πλαισίου στην περιοχή της θεμελίωσης του καθώς επίσης και η κατά μήκος σύνδεση του με διαμήκεις συνδέσμους με τα προηγούμενα πλαίσια .

Διαφορετική επίσης είναι και η περίπτωση κατηγορίας πετρωμάτων στην οποία έχει εκτιμηθεί ότι πρέπει να κατασκευασθεί ανεστραμμένο τόξο πυθμένα .

Στην περίπτωση αυτή η εκσκαφή, η άμεση υποστήλωση και η κατασκευή του ανεστραμμένου τόξου πυθμένα πρέπει να ολοκληρώνεται άμεσα προκειμένου να επιτευχθεί η συνολική λειτουργία του στατικού δακτυλίου της άμεσης υποστήριξης ενώ η κατασκευή του πυθμένα με ανεστραμμένο θόλο (*invert*) πρέπει να γίνεται στις επόμενες δυο φάσεις .



5.2. Στεγανοποιητικός Φορέας Της Σήραγγας (Υδρομαστευτική στρώση + Στεγανοποιητική μεμβράνη)

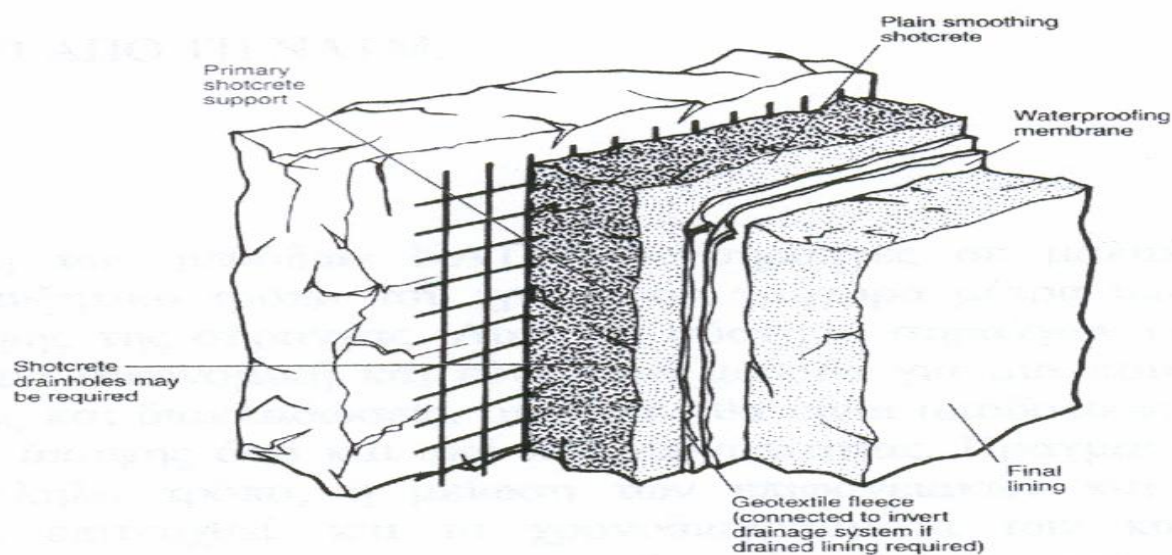
Κατά την κατασκευή του παρόντος έργου προκύπτουν απαιτήσεις πλήρης στεγάνωση της διατομής χρήσης της σήραγγας, από τα ύδατα της βραχώμαζας, διότι τούτο εξυπηρετεί καλύτερα τις ανάγκες κυκλοφορίας της σήραγγας και συγχρόνως παρέχει ασφάλεια των κατασκευών της από την παρουσία υδάτων . Διαφορετικά, ενδέχεται πιθανότητα εμφάνισης κίνδυνων βραχυκυκλωμάτων στις Η/Μ εγκαταστάσεις και διάβρωση των κατασκευών από σκυρόδεμα .

Η ικανοποίηση της βασικής απαίτησης στεγανότητας επιτρέπει τον υπολογισμό της τελικής επένδυσης της σήραγγας χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το φορτίο από υδροστατική πίεση, λόγω συγκέντρωσης υδάτων, γεγονός που τελικά σημαίνει εξοικονόμηση δαπάνης κατά την κατασκευή της τελικής επένδυσης . Ο βαθμός

της στεγανότητας και η έκταση των εργασιών στεγάνωσης καθορίζονται σύμφωνα με την ελάχιστη επιτρεπόμενη ποσότητα υδάτων .

Πλήρης στεγάνωση των κατασκευών επιτυγχάνεται με τη χρήση γεωφασμάτων για την υδρομαστευτική στρώση και στεγανωτικών μεμβρανών από υψηλά πολυμερή, συνήθως από χλωριούχο πολυβινύλιο και τα οποία τοποθετούνται περιμετρικά της διατομής της σήραγγας .

ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΑ ΣΤΕΓΑΝΟΠΟΙΗΤΙΚΟΥ ΦΟΡΕΑ

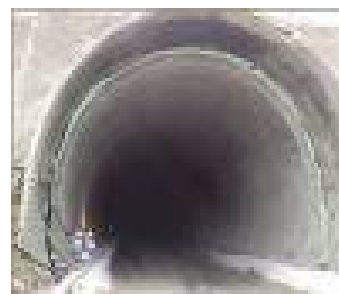


Η στεγανοποίηση των σηράγγων αποβλέπει στα ακόλουθα αποτελέσματα .

- Ø Απαλλαγή της τελικής επένδυσης της σήραγγας από υδροστατικό φορτίο .
- Ø Περιορισμό της υγρασία μέσα στη σήραγγα, γεγονός που θα παρεμπόδιζε την ορθή λειτουργία της .
- Ø Αποφυγή ροών υδάτων που θα επέτρεπαν αποπλύσεις και θα ευνοούσαν διαβρώσεις .
- Ø Εξασφάλιση καθοδηγημένης απαγωγής όλων των εμφανίσεων υδάτων μέσω του συστήματος αποστράγγισης .

Τον καθορισμό των απαιτήσεων στεγάνωσης επηρεάζουν,

όχι όμως περιοριστικά, οι ακόλουθοι παράγοντες του έργου



- Ø Γεωλογικές συνθήκες .
- Ø Αναμενόμενες φορτίσεις από τη βραχώμαζα .
- Ø Χημικές ιδιότητες του ύδατος και του πετρώματος .
- Ø Τρόπος κατασκευής του έργου .
- Ø Απαιτήσεις στεγανότητας σε σχέση με τη χρήση της σήραγγας, όπως οδική σήραγγα, σιδηροδρομική σήραγγα, σήραγγα **METRO** .
- Ø Αναμενόμενες παραμορφώσεις, καθιζήσεις και σχετικές μετακινήσεις των στεγανοποιημένων τμημάτων της σήραγγας .
- Ø Αντιμετώπιση της υδροστατικής πίεσης από τις εργασίες στεγάνωσης .

Η άποψη της στεγανοποίησης των διατομών της σήραγγας συνίσταται για τους παρακάτω λόγους .

- Ø Πολύ συχνά οι αποστραγγίσεις φράσσονται από αβεστικά καθιζήματα τα οποία δημιουργούνται όταν το υπόγειο νερό έρθει σε επαφή με τον αέρα που κυκλοφορεί στους αποστραγγιστικούς αγωγούς .
- Ø Μια στεγανοποίηση για πιέσεις έως **3 atm**, που ισοδυναμεί με **30 m** υδάτινης στήλης, δεν επιφέρει σχεδόν καμιά οικονομική επιβάρυνση .
- Ø Απαλλαγή της τελικής επένδυσης της σήραγγας από υδροστατικό φορτίο .
- Ø Περιορισμό της εργασίας μέσα στη σήραγγα, γεγονός που θα ενοχλούσε την ορθή λειτουργία της .
- Ø Αποφυγή ροών ύδατος τα οποία θα επέτρεπαν αποπλύσεις και θα ευνοούσαν διαβρώσεις .
- Ø Εξασφάλιση καθοδηγούμενης απαγωγής όλων των εμφανίσεων των υδάτων μέσω του συστήματος στράγγισης .

Η διαστρωμάτωση των εργασιών κατασκευής του τελικού φορέα της σήραγγας, εντελώς αναφορικά, κατά σειρά πραγματοποίησης συνίσταται στα ακόλουθα .

- Ø Υπάρχει, καταρχήν, η επιφάνεια της βραχώμαζας .
- Ø Διάστρωση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της άμεσης υποστήριξης, πάνω στην επιφάνεια της βραχώμαζας .
- Ø Εντός του εκτοξευόμενου σκυροδέματος αναπτύσσεται το δίκτυο των πλαστικών αγωγών των υδρομαστεύσεων, οι οποίες πραγματοποιούνται στις περιοχές μεγάλης υδροφορίας .
- Ø Πάνω στην επιφάνεια του εκτοξευόμενου σκυροδέματος (*υποστρώματος*) τοποθετείται η εξομαλυντική, στεγανοποιητική στρώση .
- Ø Τοποθέτηση των μέσων στερέωσης της μονωτικής μεμβράνης πάνω στο γεωφάσμα .
- Ø Τοποθέτηση, με θερμοσυγκόλληση, της στεγανωτικής μεμβράνης πάχους **2,0 mm** .
- Ø Τοποθέτηση προστατευτικής στρώσης .
- Ø Ανάρτηση του προβλεπόμενου οπλισμού .
- Ø Κατασκευή της τελικής επένδυσης της σήραγγας



5.2.1. Υδρομαστευτική Στρώση

Ο ρόλος του γεωφάσματος χαρακτηρίζεται διττός και καθιστά ιδιαίτερα σημαντική τη λειτουργία του . Η υδρομαστευτική στρώση (γεωφάσμα) χρησιμοποιείται αφενός μεν για να προστατεύσει την στεγανοποιητική μεμβράνη η οποία κινδυνεύει να πληγωθεί από πιθανές καταπονήσεις μηχανικής, χημικής, θερμικής και υδραυλικής πίεσης, από πίεση της επάνω σε κάποιο προεξέχον τμήμα της άμεσης υποστήριξης, αφετέρου για να δημιουργηθεί μια αποστραγγιστική στρώση περιμετρικά της διατομής δια της οποίας θα απάγεται το νερό και θα οδηγείται στους κατά μήκος συλλεκτήριους αγωγούς δια των οποίων και θα απομακρύνονται . Ως εκ τούτου αποφεύγεται η αύξηση της υδροστατικής πίεσης .

Η διάταξη της υδρομαστευτικής στρώσης εκτείνεται ακτινικά πάνω στην επιφάνεια του θόλου και των παρειών της σήραγγας και απολήγει στη σύνδεση με τον αποστραγγιστικό σωλήνα, στη βάση της διατομής δηλαδή στο σημείο επαφής των παρειών με τον πυθμένα της σήραγγας . Τα δε φύλλα του γεωφάσματος επικαλύπτονται μεταξύ τους κατά **20 ÷ 30 cm** .

Σε περιοχές μεγάλης υδροφορίας συνίσταται η τοποθέτηση διπλής στρώσης γεωφάσματος ώστε να εξασφαλισθούν όσο το δυνατόν καλύτερα οι συνθήκες αποστράγγισης της βραχώμαζας και να οδηγηθούν ασφαλώς τα ύδατα της βραχώμαζας προς το κάτω μέρος της παρειάς της σήραγγας, όπου είναι τοποθετημένος ο διάτρητος αποστραγγιστικός αγωγός .

Προκειμένου να διασφαλισθεί η λειτουργία του γεωφάσματος είναι απαραίτητο ο τύπος του να χαρακτηρίζεται από υψηλές μηχανικές ιδιότητες ώστε να αντιμετωπισθούν οι αναμενόμενες

εφελκυστικές και διατμητικές δυνάμεις που θα αναπτυχθούν περιμετρικά της διατομής, εξαιτίας των πιέσεων των υπερκειμένων πετρωμάτων καθώς και οι υδροστατικές πιέσεις λόγω της ύπαρξης του υδροφόρου ορίζοντα .Επιπροσθέτως πρέπει η υδατοπερατότητα της, για δεδομένες συνθήκες πίεσης, να είναι επαρκής . Συνεπώς τα υλικά κατασκευής του γεωφάσματος πρέπει να είναι ανθεκτικά στη διαβρωτική – αποσαθρωτική δράση βιολογικών και χημικών παραγόντων .

Η εφαρμογή του γεωφάσματος, όπως και της στεγανωτικής μεμβράνης πραγματοποιείται με χρήση ειδικού ηλεκτροκίνητου, τηλεχειριζόμενου κριώματος, μήκους **6.0 m**, το οποίο καλύπτει ολόκληρο το ανάπτυγμα της σήραγγας .



5.2.2. Στεγανοποιητική μεμβράνη

Η υδατοστεγής μεμβράνη αποκλείει εντελώς τη διείσδυση ύδατος μέσα στην μόνιμη επένδυση, εκτρέποντας τα ύδατα της βραχώμαζας προς τον αποστραγγιστικό αγωγό και εξασφαλίζοντας έτσι την πλήρη στεγάνωση της διατομής χρήσης της σήραγγας .

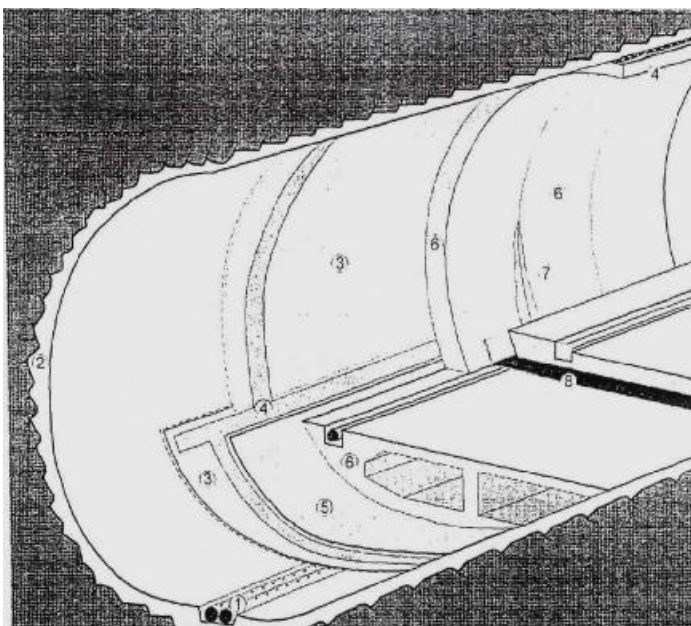
Έτσι δημιουργείται στο εξωρράχιο της τελικής επένδυσης ένας «στεγανός αγωγός», που επιτρέπει την ασφαλή συνέχιση των εργασιών της τελικής επένδυσης, απαλλαγμένης από τα ύδατα της βραχώμαζας και γενικότερα τη λειτουργία της σήραγγας υπό συνθήκες στεγανότητας . Ουσιαστικά αποτελεί το κύριο συστατικό της υδατοστεγανής επένδυσης, γεγονός από το οποίο καθορίζεται ο βαθμός υδατοστεγάνωσης .

Η στεγανωτική στρώση είναι κατασκευασμένη από χλωριούχο πολυβινύλιο (**PVC**), ονομάζεται **FLAGON BSL**, έχει πάχος **2.00 mm** και διατίθεται στο εμπόριο σε φύλλα τυποποιημένων διαστάσεων .

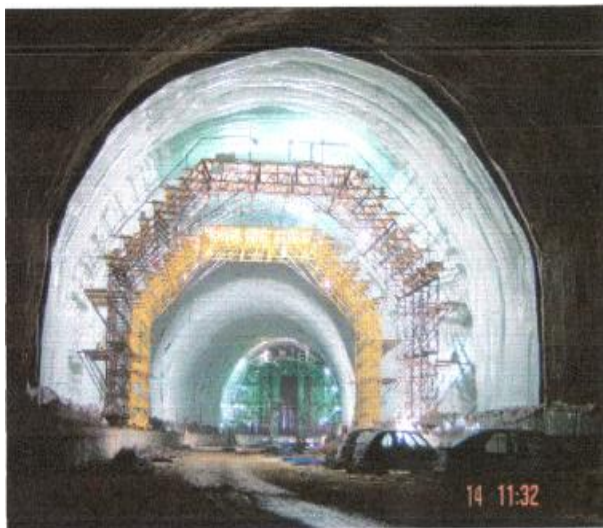
Η μεμβράνη στεγάνωσης πρέπει να τοποθετείται σωστά, ιδιαίτερα στην περιοχή του εσωραχίου και στις ανωμαλίες που δημιουργούνται κατά την εκσκαφή των σηράγγων καθώς παραμένει και μετά τη διάστρωση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος . Είναι προτιμότερο οι εργασίες στεγάνωσης να αρχίζουν μόνο αφού η σήραγγα έχει πλήρως ανοιχθεί .

ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΟΝΗΣ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ

1. Αποστράγγιση
2. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα
3. FPO/ PVC πολυμερείς μεμβράνες στεγάνωσης



4. **Water stop εάν απαιτείται**
5. **Προστατευτική στρώση**
6. **Οπλισμένο σκυρόδεμα της εσωτερικής διαμόρφωσης**

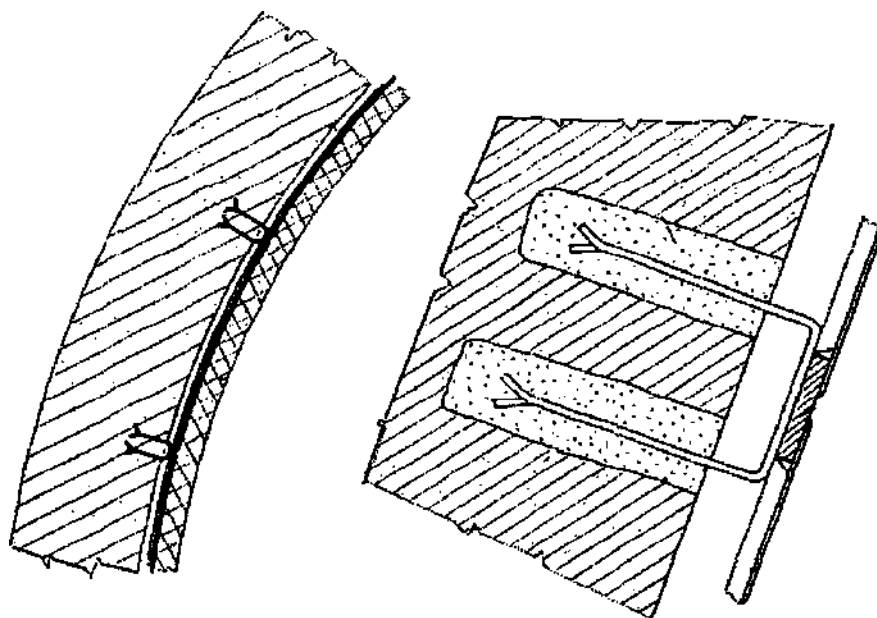


7. **Ενέσιμο έγχυμα πλήρωσης ρωγμών από συνθετικές ρητίνες**
8. **Στεγάνωση καταστρώματος**

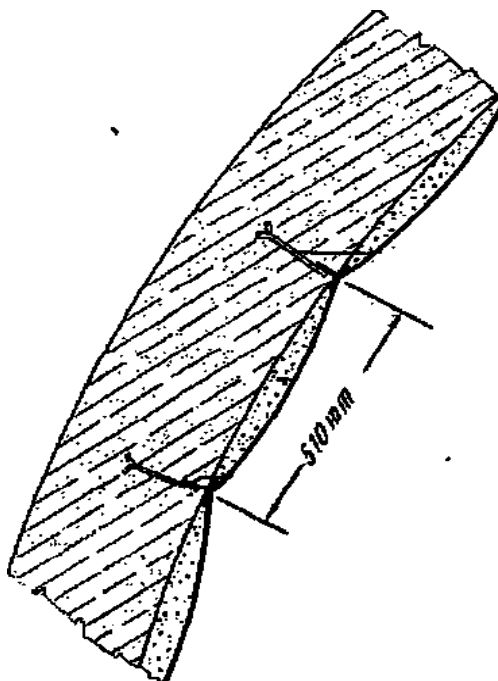
Παρόλο που η στεγανοποίηση με φύλλα θερμοπλάστ έδωσε καλά μέχρι τώρα αποτελέσματα, εν τούτοις η μέχρι τώρα εμπειρία μας δεν επιτρέπει κρίση σχετικά με την διάρκεια διατηρήσεως τους . Τέλεια στεγανοποίηση δίνει, υπό σημερινές συνθήκες, η χρησιμοποίηση θωράκισης από ατσάλι - λευκοσίδηρο, η οποία όμως λόγω υψηλού κόστους χρησιμοποιείται σήμερα σπανίως . Η στεγανοποίηση με ατσάλι - λευκοσίδηρο μπορεί να γίνει στην

εξωτερική επιφάνεια του τοιχώματος της σήραγγας .

Παρακάτω, περιγράφονται δυο τύποι εσωτερικής στεγανοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν στον υπόγειο της Βουδαπέστης . Ο πρώτος τύπος αφορά μια ελαφρά, **3-4 mm** πάχους, επένδυση από ατσάλι - λευκοσίδηρο, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα .



Στον δεύτερο τύπο, η ελαφρά αυτή επένδυση προορίζεται, εκτός από το να παράσχει μόνωση και στο να δεχθεί την εξωτερική πίεση του νερού, λεπτομέρειες αυτού φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα .



5.3. Αποστράγγιση Υπόγειου Ανοίγματος Κατά Τη Φάση Όρυξης

Για τον καθορισμό των απαιτούμενων μέτρων αποστράγγισης του υπόγειου τμήματος της σήραγγας συναξιολογούνται τα ακόλουθα στοιχεία .

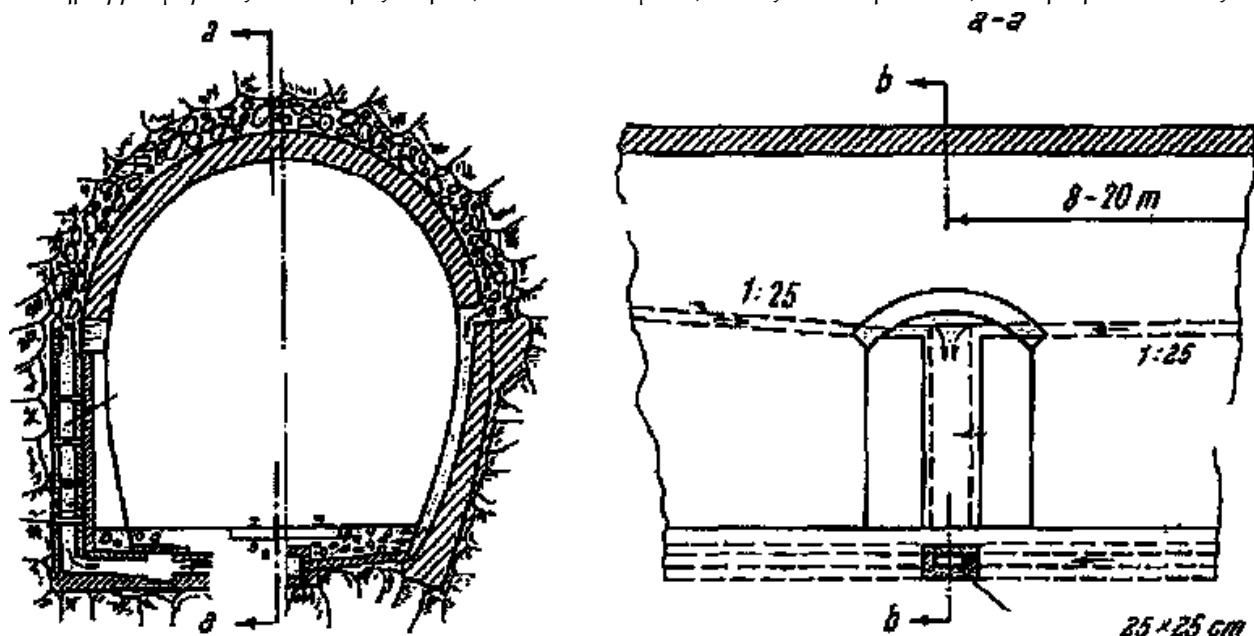
- Ø Οι υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής του έργου .
- Ø Η φύση των γεωλογικών σχηματισμών που εντοπίζονται στην περιοχή του έργου .
- Ø Η αναμενόμενη βελτίωση της συμπεριφοράς της υπόγειας εκσκαφής με τη διενέργεια της αποστράγγισης .

Βάσει, των ανωτέρω συνάγεται ότι κατά μήκος του υπόγειου τμήματος της σήραγγας δεν αναπτύσσεται υδροφόρος ορίζοντας . Ενδέχεται όμως να αναπτυχθούν εγκλωβισμένοι υδροφόροι ορίζοντες, μικρής δυναμικότητας, σε απομονωμένα καρστικά έγκοιλα στα οποία δίνεται η δυνατότητα εκτόνωσης, με τη δημιουργία της επιφάνειας εκσκαφής της σήραγγας .

Το αποστραγγιστικό σύστημα μιας σήραγγας αποτελείται από δύο κύρια τμήματα . Από ένα δίκτυο συγκεντρώσεως των υδάτων, που είναι κατανεμημένο πάνω από τη διατομή της σήραγγας και από τα αυλάκια απαγωγής, που είναι διατεταγμένα κατά μήκος του άξονα της σήραγγας . Το νερό που συλλέγεται στην σήραγγα απάγεται, εκτός αυτού, με τη βοήθεια ενός αυλακιού το οποίο κατασκευάζεται είτε κατά μήκος του άξονα της σήραγγας είτε δίπλα στους πλευρικούς τοίχους της σήραγγας .

Στη πρώτη περίπτωση, κατασκευάζεται ένα αυλάκι, από μπετό ή φυσικό πέτρωμα πάνω από τον θόλο των θεμελίων. Η διάταξη αυτή, όμως, έχει το μειονέκτημα πως η προσέγγιση δεν είναι εύκολη για εργασίες καθαρισμού ή βελτιώσεις της εγκατάστασης. Στην δεύτερη περίπτωση, έχουμε λόγω της πλάγιας τοποθέτησης του καναλιού, καλύτερη προσέγγιση αλλά έχουμε μειονεκτήματα που αναφέρονται στην ασφάλεια της διατομής, όπως παρατηρείται στο ακόλουθο σχήμα.

Στο κεντρικό κανάλι, το νερό σε ελεύθερη πτώση απάγεται είτε προς τα έξω ή με άντληση. Εάν έχουμε στο σήραγγα μεγάλες ποσότητες νερού, τότε απλά μέσα, όπως τα παραπάνω, δεν βοηθούν. Στις



περιπτώσεις αυτές, χρειάζεται κατασκευή ειδικών αγωγών αποστραγγίσεως.

Ειδικά, στην περίπτωση των υπόγειων σιδηροδρομικών σηράγγων η υπό το εδαφικό νερό εισβολή ύδατος πρέπει να αποκλείεται εντελώς, γιατί εκτός του ότι απαιτεί τη καταβολή μεγάλης ποσότητας ενέργειας για την άντληση, προκαλεί και πρόωρη καταστροφή των τοιχωμάτων του σήραγγα.

Λόγω του διαπερατού έως ημιδιαπερατού κατά θέσεις χαρακτήρα της βραχώμαζας, εκτιμάται ότι κατά τη διάνοιξη δεν αναμένεται να δημιουργηθούν ιδιαίτερα προβλήματα από εισροές υπόγειων υδάτων.

Καθώς δεν αναμένονται εισροές υδάτων στις σήραγγες, θεωρείται μη απαραίτητη η εφαρμογή ειδικών μέτρων απομάκρυνσης των υδάτων κατά τη κατασκευή. Προκειμένου όμως να προβλεφθούν μέτρα ελεγχόμενης εκτόνωσης, ο υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας προσδιορίστηκε για κατάλληλη διάταξη οπών αποστράγγισης από το εσωτερικό της σήραγγας και ανακουφιστικών οπών του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Με την αποστράγγιση νοείται η παροχή όλων των μηχανικών μέσων που απαιτούνται για την απομάκρυνση των υδάτων της βραχώμαζας από την περιοχή του μετώπου και από τη ζώνη προσβολής καθώς επίσης και για την προσωρινή απαγωγή του εκτός σήραγγας, κατά τρόπο που να μην εμποδίζει τη διεξαγωγή των εργασιών διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης της σήραγγας. Η απαγωγή αυτή, συνήθως, πραγματοποιείται με τη δημιουργία κατάλληλου θύλακος, διαστάσεων ανάλογων με τις εμφανιζόμενες ποσότητες ύδατος της βραχώμαζας.

Σε περίπτωση που οι σήραγγες διανοίγονται από μέτωπα στα οποία, λόγω της κατά μήκος κλίσης του έργου θα συσσωρευούνται ύδατα, επιβάλλεται η πρόβλεψη για την άντληση των υδάτων προς την έξοδο και τον αποδέκτη των υδάτων. Για τα λοιπά μέτωπα, συνίσταται η κατάλληλη διαμόρφωση της κατά μήκος κλίσης της θύλακος απαγωγής έτσι ώστε να μη παρεμποδίζεται η ροή των υδάτων προς τον αποδέκτη τους.

Τα ύδατα της βραχώμαζας τα οποία οδηγούνται στην έξοδο της σήραγγας, είναι συνήθως ανακατεμένα με λάδια μηχανημάτων και λοιπές ακαθαρσίες που προέρχονται από τις εργασίες διάνοιξης της σήραγγας. Για το λόγο αυτό, οδηγούνται σε ειδική δεξαμενή συγκέντρωσης, όπου σε πρώτη φάση αφήνονται να καθιζήσουν τα στερεά υπολείμματα σε ειδικό χώρο και έπειτα το καθαρισμένο νερό αφήνεται ελεύθερο να ρέει στο φυσικό αποδέκτη. Η άνωθεν ροή προς τον φυσικό αποδέκτη μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε μέσω αγωγών, είτε απευθείας από τη δεξαμενή καθίζησης με μικρή κατάντη

διαρρύθμιση . Η δεξαμενή καθίζησης καθαρίζεται από τα στερεά κατάλοιπα σε τακτά χρονικά διαστήματα ώστε να διευκολύνεται η λειτουργία της . Παρόμοια δεξαμενή καθίζησης κατασκευάζεται σαν μόνιμη κατασκευή στα στόμια των σηράγγων για τη συγκέντρωση σε μόνιμη βάση των υδάτων του καταστρώματος της σήραγγας .

Πιο συγκεκριμένα, στον ασβεστολιθικό σχηματισμό αναμένεται τοπικά η ανάπτυξη υγρασίας ή και εφιδρώσεων της γεώμαζας . Στη δυσμενέστερη περίπτωση αναμένεται η εισροή υπόγειων υδάτων κατά τη διάνοιξη της σήραγγας με παροχή μερικών δεκάδων λίτρων την ώρα η οποία όμως αναμένεται πολύ γρήγορα να εκτονωθεί λόγω της αμελητέας δυναμικότητας των υφιστάμενων υδροφόρων οριζόντων .

Γενικά εκτιμάται ότι οι εισροές υπογείων υδάτων στη φάση των εκσκαφών για τη διάνοιξη της σήραγγας θα είναι μικρές . Επίσης, λόγω της φύσης και της ανάπτυξης του γεωλογικού σχηματισμού στην επιφάνεια, αναμένεται να παρατηρείται εισροή υδάτων λόγω κατεΐσδυσης επιφανειακών κατακρημνισμάτων, ιδιαίτερα, μετά από βροχοπτώσεις ορισμένης διάρκειας.

Εντός των γεωλογικών σχηματισμών κατά μήκος του υπογείου τμήματος της σήραγγας δεν αναπτύσσεται υδροφόρος ορίζοντας, ενδέχεται όμως να αναπτύσσονται εγκλωβισμένοι ή επικρεμάμενοι υδροφόροι ορίζοντες, μικρής δυναμικότητας, σε απομονωμένα καρστικά έγκοιλα μικρών διαστάσεων στα οποία δίδεται η δυνατότητα εκτόνωσης με τη δημιουργία της επιφάνειας εκσκαφής της σήραγγας . Για τους ανωτέρω λόγους εφαρμόστηκαν αποστραγγιστικές οπές Φ3", μεταβλητού μήκους και διάταξης .

5.3.1. Άντληση Υπόγειου Ύδατος

Με βάση τις γεωλογικές και υδρογεωλογικές μελέτες δεν προβλέπεται η παρουσία υπόγειου ύδατος κάποιας σημαντικής παροχής, με συνεχή παρουσία . Σύμφωνα και με τις υπάρχουσες εκτιμήσεις, οι σήραγγες θα είναι στεγνές, ενδέχεται όμως η παρουσία εποχικών επιφανειακών εισροών ή και η ξαφνική εμφάνιση από διατάραξη παγιδευμένου ύδατος εντός θυλάκων . Σε αυτές τις περιπτώσεις, το παραπάνω φαινόμενο αντιμετωπίζεται ως προσωρινό καθώς και με τη χρήση αντλιών **FLYGH**T βυθιζόμενων .

Έτσι, έχουμε τοπική άντληση και μεταφόρτωση του ύδατος κυρίως για λόγους καθαριότητας του μετώπου της σήραγγας . Αντιθέτως, στην περίπτωση συνεχούς ροής υπόγειου ύδατος σημαντικής παροχής, εγκαθίσταται σύστημα άντλησης με σωληνογραμμή ακαθάρτων και δεξαμενή καθίζησης στην έξοδο, για την αποβολή όσο γίνεται πιο καθαρού ύδατος στις εξόδους .

5.3.2. Υδρομάστευση Σε Περιοχές Μεγάλης Υδροφορίας

Στις περιοχές μεγάλης υδροφορίας διατάσσεται σύστημα αποστραγγιστικών οπών

Οι ποσότητες των υδάτων που συλλέγονται από τις αποστραγγιστικές οπές, συγκεντρώνονται σε ειδικό δίκτυο πλαστικών αγωγών, κατάλληλων διαμέτρων και οδηγούνται στο διάτρητο αποστραγγιστικό αγωγό, χωρίς να παραβλέπεται η στεγανότητα της διατομής χρήσης της σήραγγας . Η τοποθέτηση των πλαστικών αγωγών πραγματοποιείται ταυτόχρονα με τις εργασίες για την κατασκευή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ώστε οι αγωγοί να ενσωματωθούν στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα .

5.3.3. Στεγάνωση Των Μετώπων Εισόδου Της Σήραγγας

Η σύνδεση των στεγανωτικών κατασκευών εντός της σήραγγας με εκείνες των εισόδων, απαιτεί ιδιαίτερη διαμόρφωση λόγω του ότι η σύνδεση πραγματοποιείται σε περιοχή ευαίσθητη σε καθιζήσεις . Κατά κανόνα οι κατασκευές εισόδου διαμορφώνονται μετά την ολοκλήρωση της εσωτερικής επένδυσης με σκυρόδεμα και κατά συνέπεια στο χρόνο που μεσολαβεί πρέπει να προστατεύεται η στεγάνωση με βοηθητικά μέσα . Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής της εισόδου, απομακρύνεται η βοηθητική στερέωση και σφραγίζεται ο αρμός . Η είσοδος, που κατασκευάζεται με ανοικτή μέθοδο, στεγανώνεται αφού περιληφθεί η μεμβράνη μεταξύ δύο γεωφρασιμάτων προστασίας .



Στην
(μετώπων) της

περιοχή των στομιών
σήραγγας δύναται η

κατασκευή συστήματος συγκέντρωσης και απαγωγής των ποσοτήτων νερού που συγκεντρώνονται στις περιοχές αυτές από το εξωτερικό της σήραγγας . Τα ύδατα αυτά είτε προέρχονται από την στράγγιση της βραχώμαζας στα μέτωπα της σήραγγας και οδηγούνται εκεί από τους αγωγούς συγκέντρωσης τους, είτε προέρχονται από την στράγγιση του οδοστρώματος οδικών έργων εκατέρωθεν της σήραγγας, εφόσον απορρέουν προς την κατεύθυνση της σήραγγας .

Τα παραπάνω ύδατα και υγρά δύναται να συγκεντρωθούν σε δεξαμενές συγκέντρωσης και διαχωρισμού, με εφαρμογή του μετέπειτα καθαρισμού τους και διέξοδο τους προς τους φυσικούς αποδέκτες, κοντά στα στόμια .

5.4. Αερισμός Της Σήραγγας Κατά Την Διάνοιξη Αυτής

Αερισμός των μετώπων εισόδου κατά τη διάρκεια κατασκευής

Είναι ήδη γνωστό ότι η προσβολή της σήραγγας πραγματοποιείται παράλληλα από δύο μέτωπα και

με τον τρόπο αυτό δεν αναμένεται να κατασκευαστεί από ένα μέτωπο μήκος σήραγγας μεγαλύτερο από **200 m** . Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε φυσικό σύστημα αερισμού με χρήση εύκαμπτων αγωγών προσαγωγής αέρα, τοποθέτηση ανεμιστήρων σε κάθε στόμιο και σύστημα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα εντός της σήραγγας .

Ο αγωγός προσαγωγής του αέρα έχει διάμετρο **1200 mm** και το μήκος των τεμαχίων του αεραγωγού είναι **15 m** και συνδέονται μεταξύ τους με κόλλα και μεταλλικό «στεφάνι» . Η απόσταση του αεραγωγού από το μέτωπο κυμαίνεται περί τα **30 m ÷ 40 m** .

Οι αγωγοί αερισμού είναι στερεωμένοι στον θόλο και απαιτείται απόσταση τουλάχιστον **50 cm** μεταξύ των αγωγών και των παρειών του εξοπλισμού που διακινείται στη σήραγγα.

Ο εισαγόμενος αέρας πρέπει να είναι απαλλαγμένος από κάθε μόλυνση, σκόνη, καπνούς και για το σκοπό αυτό πρέπει η θέση λήψης αέρα να ευρίσκεται μακριά από κάθε πηγή ενδεχόμενης μόλυνσης, δηλαδή σε απόσταση περίπου **30 m** από τα στόμια .

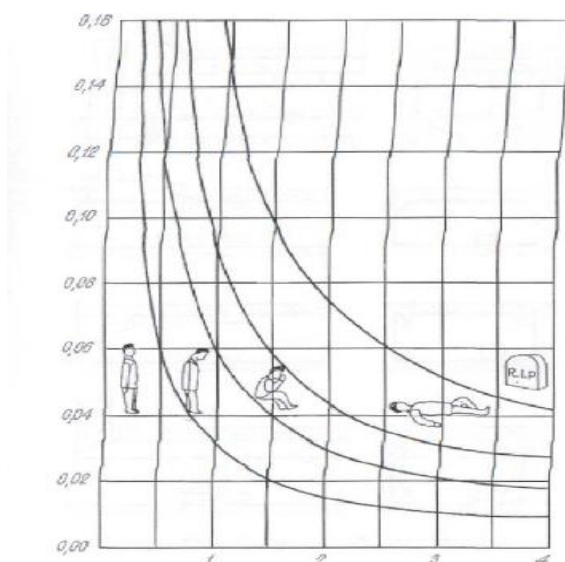
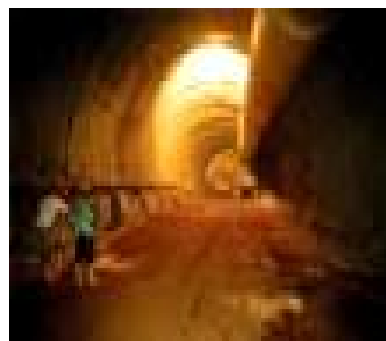
Η δε σύσταση του αέρα στις σήραγγες, σε όλο το μήκος τους, πρέπει να πληροί ποιοτικά και ποσοτικά κάποιους όρους που είναι απαραίτητα για την ασφάλεια και την υγιεινή των εργαζομένων . Έτσι το ποσοστό οξυγόνου είναι ορθό να ελέγχεται έτσι ώστε να μην μειωθεί κάτω από **20%** .

Η απαιτούμενη παροχή αέρα υπολογίζεται με βάση τον μέγιστο αριθμό, εντός της σήραγγας, εργαζομένων και την μέγιστη απόδοση του ντιζελοκίνητου εξοπλισμού που θα λειτουργεί στο εσωτερικό κάθε σήραγγας . Πιο συγκεκριμένα, οι απαιτήσεις σε αέρα συνοψίζονται στις ακόλουθες .

- Ø **3 m³ / min** για κάθε άτομο που θα απασχολείται σε εκάστη σήραγγα .
- Ø **4 m³ / min** για κάθε μετρικό ίππο (**HP**) ντιζελοκίνητου εξοπλισμού, που χρησιμοποιείται σε κάθε μέτωπο .

Όταν, από τους σχετικούς ελέγχους, διαπιστώνεται ότι ο φυσικός αερισμός στις σήραγγες δεν επαρκεί, πρέπει να γίνει άμεση εξυγίανση της ατμόσφαιρας με τεχνητό αερισμό, ο οποίος αποσκοπεί στα εξής .

- Ø Να δώσει στους εργαζόμενους καθαρό αέρα, σε αντικατάσταση αυτού που έχει χρησιμοποιηθεί από τους ίδιους, τα μηχανήματα ή οχήματα ή έχει απορριφθεί από τα αέρια και τα ύδατα που τυχόν αναβλύζουν .
- Ø Να διαλύσει και να απομακρύνει αέρια και κονιορτούς που παράγονται κατά την εργασία, τις εκρήξεις ή αναδύονται από το έδαφος .
- Ø Να αντικαταστήσει το ζεστό αέρα των υπόγειων χώρων με αέρα χαμηλότερης θερμοκρασίας .
- Ø Να εξισορροπήσει την πίεση στο εργασιακό περιβάλλον .



Παράσταση του βαθμού κινδύνου από την περιεκτικότητα σε CO συναρτήσει της διάρκειας παραμονής (επιδράσεις όχι αντιληπτές - επιδράσεις αντιληπτές - πονοκέφαλος &

αδιαθεσία - κίνδυνος θανάτου -θάνατος)

5.4.1. Αερισμός κατά την εκσκαφή με συμβατικά μέσα

Στις υπόγειες εκσκαφές, όπου πρόκειται να εφαρμοσθεί η μέθοδος εκσκαφής με ανατινάξεις, το σύστημα αερισμού αποτελείται από δύο μέρη που είναι το κύριο σύστημα αερισμού και το δευτερεύον σύστημα .

Το **κύριο σύστημα αερισμού** είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η παροχή των παρακάτω ποσοτήτων αέρα κάθε στιγμή .

- Ø **3 m³ / min** για κάθε άτομο που θα απασχολείται στα υπόγεια έργα .
- Ø **6 m³ / min** για κάθε μετρικό ίππο (**HP**) ντιζελολκίνητου εξοπλισμού.

Επίσης ο σχεδιασμός του πρέπει να επιτρέπει αναστροφή της ροής και να λειτουργεί ως ακολούθως .

- Ø Πριν από την ανατίναξη, το σύστημα θα λειτουργεί σαν σύστημα απαγωγής ενώ τα αέρια ανατίναξης θα απορροφώνται, όσο είναι δυνατόν, πιο κοντά στο μέτωπο εκσκαφής . Ο αέρας απαγωγής και τα αέρια της ανατίναξης θα εκφορτίζονται στην έξοδο, ώστε να μην εισέρχονται σε άλλη θέση εργασίας και να μην επανακυκλοφορούν στο σύστημα παροχής φρέσκου αέρα .
- Ø Πριν από την έναρξη αποκομιδής των προϊόντων εκσκαφής, το σύστημα λειτουργεί σαν σύστημα προσαγωγής αέρα μέχρι το πέρας της αποκομιδής αυτών .

Το **δευτερεύον σύστημα αερισμού** λειτουργεί σαν σύστημα προσαγωγής και εγκατεστημένο έτσι ώστε να εξασφαλίζεται επαρκής αερισμός της περιοχής μεταξύ του μετώπου εκσκαφής και της εξόδου-εισόδου του κύριου συστήματος . Το σύστημα αυτό αρχίζει να λειτουργεί, μέχρις ότου το κύριο σύστημα αρχίσει να λειτουργεί, σαν σύστημα προσαγωγής αέρα .

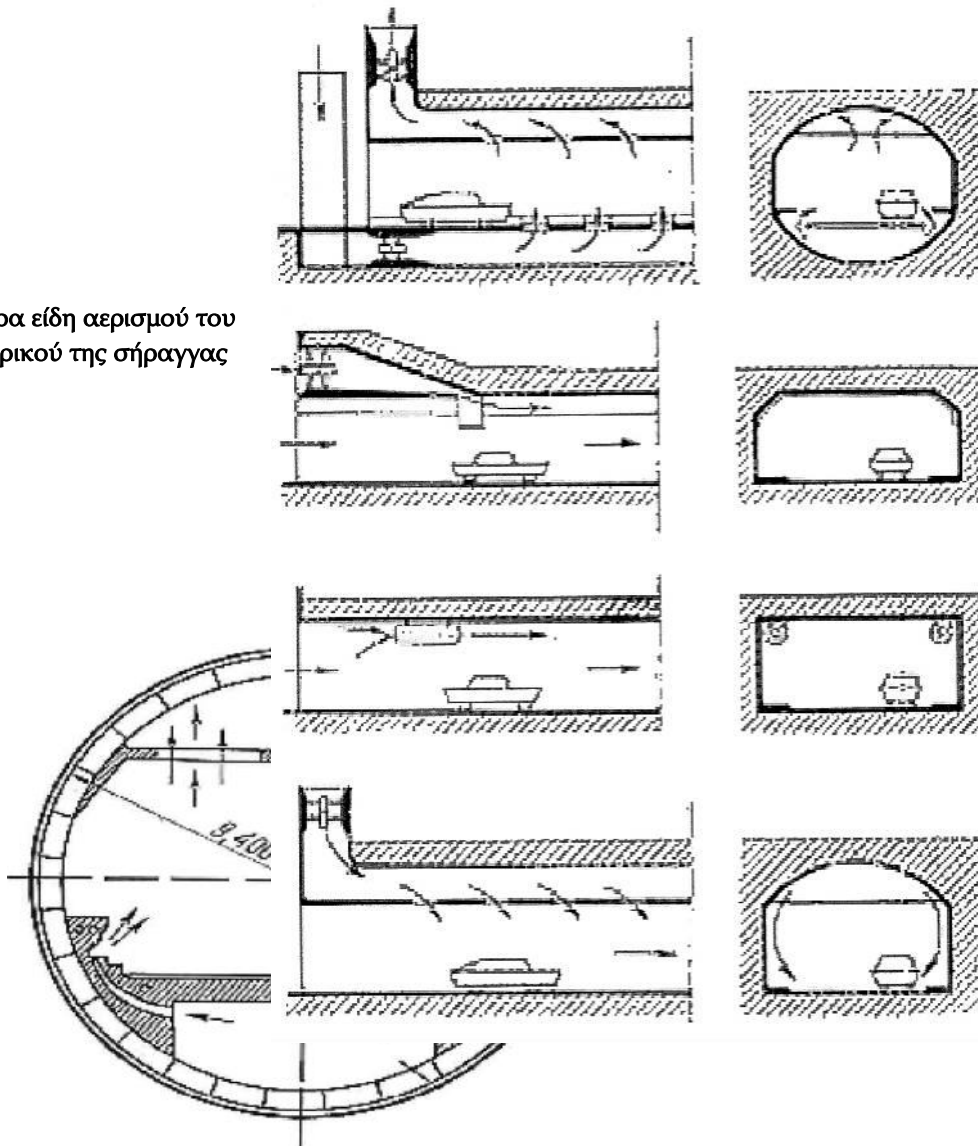
Η είσοδος του συστήματος αυτού είναι τοποθετημένη σε επαρκή απόσταση από το μέτωπο της εκσκαφής, ώστε να εξασφαλίζεται ότι τα αέρια ανατίναξης δεν θα φθάνουν σε αυτήν την περιοχή και δεν θα προκαλείται έτσι επανακυκλοφορία των αερίων ανατίναξης. Η δε έξοδος του είναι τοποθετημένη κοντά στο μέτωπο εκσκαφής, ώστε να εξασφαλίζεται η προώθηση των αερίων ανατίναξης από το μέτωπο εκσκαφής στο κύριο σύστημα αερισμού .

5.4.2. Αερισμός κατά την εκσκαφή με μηχανικά μέσα

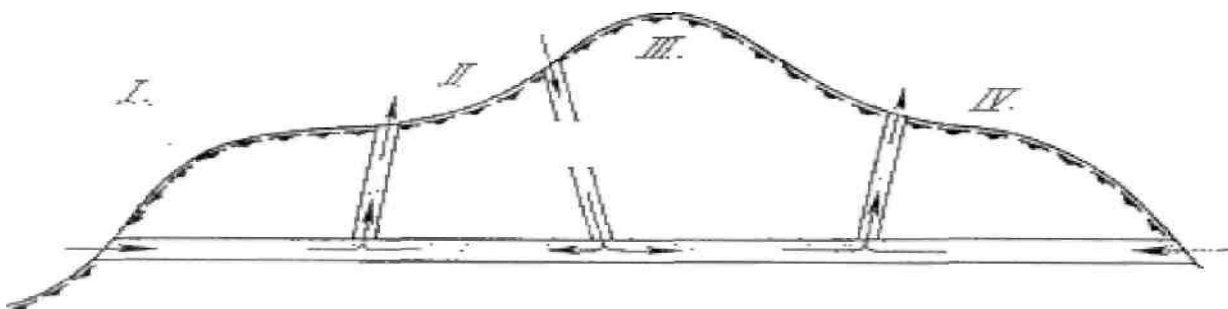
Όπου οι υπόγειες εκσκαφές εκτελούνται με μηχανικά μέσα όπως μηχανήματα ολομέτωπης διάνοιξης (**full-facer**) ή σημειακής κοπής (**road header**), εγκαθίσταται ένα σύστημα αερισμού . Αυτό το σύστημα αερισμού διαθέτει τέτοια δυναμικότητα ώστε και οι δύο ελάχιστες αποκτήσεις παροχής φρέσκου αέρα, που προαναφέρθηκαν, να ικανοποιούνται κάθε χρονική στιγμή καθώς μπορεί να είναι σύστημα απαγωγής, προσαγωγής ή συνδυασμός και των δύο .



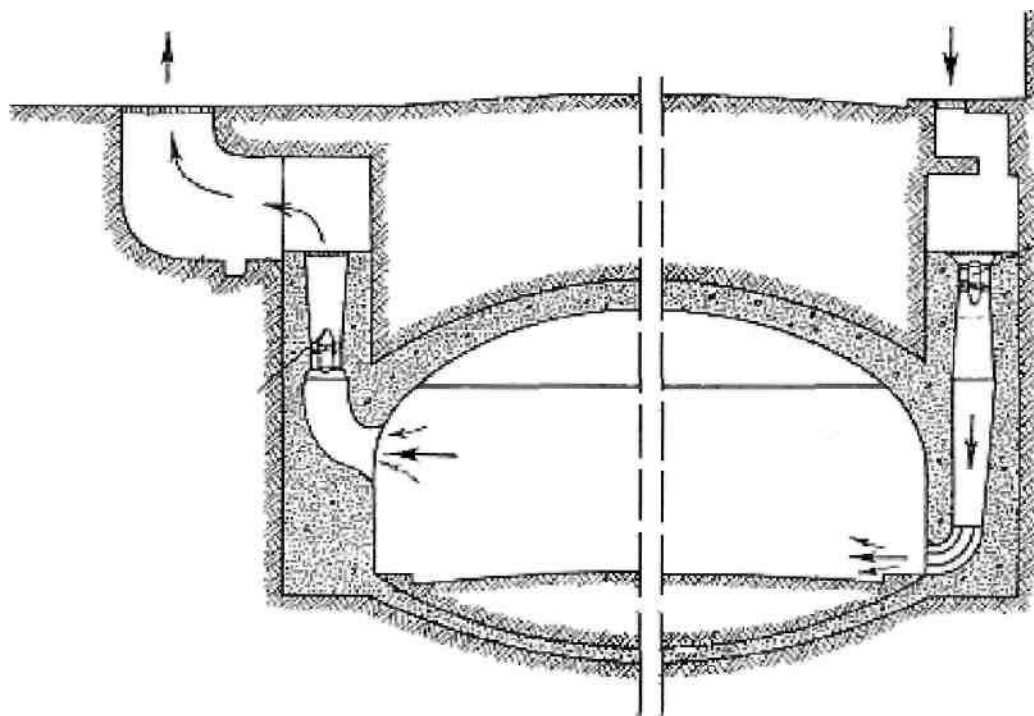
Διάφορα είδη αερισμού του εσωτερικού της σήραγγας



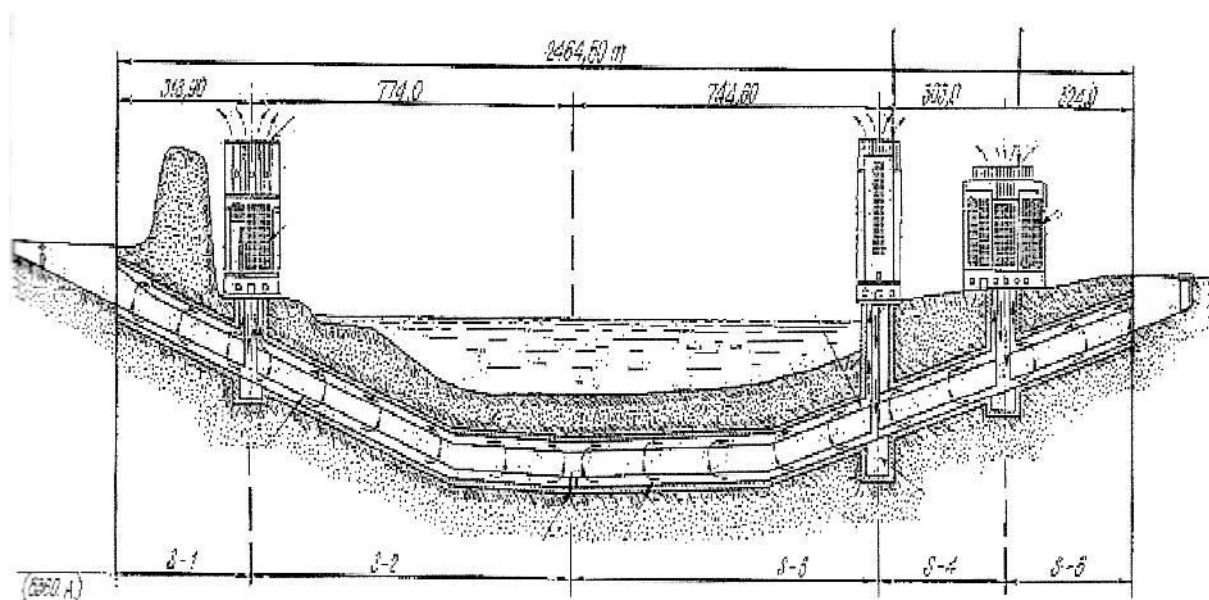
Σχηματική παράσταση αερισμού κατά την κατά μήκος κατεύθυνση



Διαδικασία εγκάρσιου αερισμού σε ένα σήραγγα δρόμου κάτω από το υπόγειο νερό



Εγκάρσιος εξαερισμός με τοποθετημένες τμηματικά ειδικές κατασκευές εξαερισμού



Τομές εξαερισμού οδικής σήραγγας κάτω από το νερό με πύργους εξαερισμού

5.4.3.Υπολογισμός της απαιτούμενης παροχής (Q_0)

Για την διάνοιξη της σήραγγας χρησιμοποιούνται ηλεκτροκίνητο διατρητικό φορείο ή ηλεκτροκίνητο εκσκαπτικό μηχάνημα και ντιζελοκίνητος εξοπλισμός για την αποκομιδή των εξορυσσόμενων προϊόντων . Οι απαιτήσεις σε παροχή καθαρού αέρα, στη δυσμενέστερη φάση της εκσκαφής, προβλέπονται ως εξής .

Ø Μέγιστος αριθμός εργαζομένων ατόμων, δεκαέξι (16) .

Οπότε, $Q_1 = 16 \cdot 3 \text{ m}^3 / \text{min} = 48 \text{ m}^3 / \text{min}$

Ø Δύο ανατρεπόμενα ντιζελοκίνητα φορτηγά κινούμενα φορτωμένα, ιπποδυνάμεως **380 HP** .
Λαμβάνεται συντελεστής ιπποδυνάμεως **0,8** εφόσον κινείται φορτωμένο και **0,6** εάν κινείται άδειο .
Έτσι έχουμε, $Q_2 = 2 \cdot (0,8 \cdot 380) \cdot 4 \text{ m}^3 / \text{min} = 2.432 \text{ m}^3 / \text{min}$.

Ø Ένα ανατρεπόμενο ντιζελοκίνητο φορτηγό, κινούμενο άδειο και ιπποδυνάμεως **380 HP** .

Άρα , $Q_3 = (0,6 \cdot 380) \cdot 4 \text{ m}^3 / \text{min} = 912 \text{ m}^3 / \text{min}$

Ø Ένας ντιζελοκίνητος φορτωτής ιπποδυνάμεως **220 HP** .

Οπότε, $Q_4 = (0,8 \cdot 220) \cdot 4 \text{ m}^3 / \text{min} = 704 \text{ m}^3 / \text{min}$.

Συνεπώς, οι συνολικές απαιτήσεις σε παροχή καθαρού αέρα στο μέτωπο εργασίας ανέρχονται σε
 $Q_0 = 4.096 \text{ m}^3 / \text{min}$.

5.4.4. Υπολογισμός της πτώσης πίεσης (h_0)

Η πτώση πίεσης οφείλεται στις απώλειες λόγω τριβών και κρούσεων, κατά την ροή του αέρα παροχής Q_0 μέσα στον πλαστικό αγωγό .

Είναι , $h_0 = 0,1 \cdot (\lambda / D^5) \cdot L_e \cdot Q_0^\alpha$

όπου, h_0 η πτώση πίεσης σε **mm H₂O** .

λ συντελεστής που κυμαίνεται από **0,021** ÷ **0,026** και η τιμή του οποίου μεταβάλλεται αναλόγως των βελών κάμψεων που παρουσιάζονται μεταξύ των σημείων στηρίξεως των τμημάτων του πλαστικού αγωγού

D η ονομαστική διάμετρος αγωγού, σε **m** .

α εκθέτης, ίσος προς **1,7** .

Συνεπώς, έχουμε ότι, $h_0 = 0,1 \cdot (0,026 / 1,2^5) \cdot 300 \cdot 68,3^{1,7}$ «

$$h_0 = 72 \text{ kp} / \text{m}^2 .$$

5.4.5. Υπολογισμός της δυναμικής πίεσεως (h_Δ)

Η δυναμική πίεση επισυμβαίνει κατά την έξοδο του αέρα από το στόμιο του αγωγού

Είναι, $h_\Delta = 0,097 \cdot Q_0^2 / D^4$ «

$h_\Delta = 0,097 \cdot 4.096^2 / 1,2^4$ «

$h_\Delta = 23 \text{ kp} / \text{m}^2$.

5.4.6. Υπολογισμός της απαιτούμενης ισχύς ανεμιστήρα (N)

Είναι, $N = Q_0 \cdot (h_0 + h_\Delta) / 60 \cdot 102 \cdot 0,85$ «

$N = 4.096 \cdot (72 + 23) / 60 \cdot 102 \cdot 0,85$ «

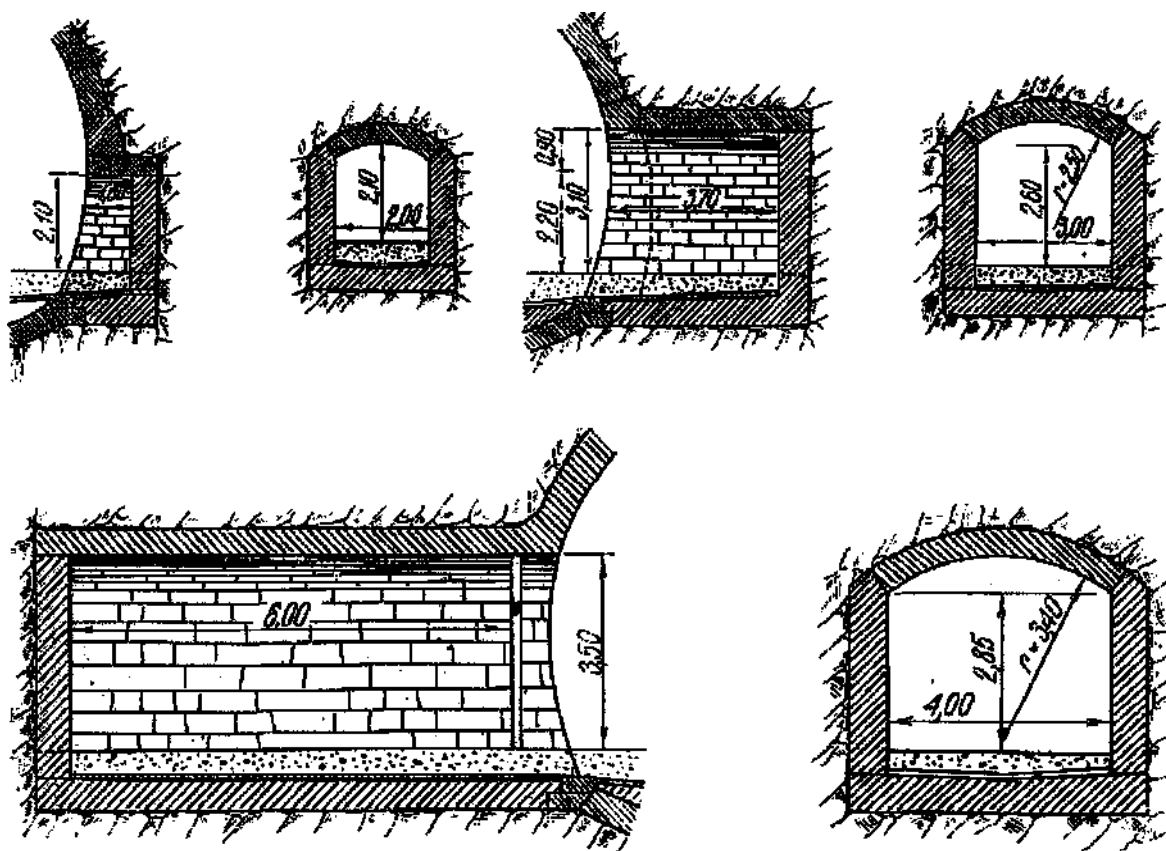
$N = 88 \text{ KW}$.

5.5. Βοηθητικές Κατασκευές Της Σήραγγας

Εκτός από τα διάφορα τμήματα και τις κατασκευές των σήραγγα που χρησιμεύουν για την λειτουργία, αποστράγγιση, αερισμό και φωτισμό πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα για την κατασκευή ειδικών θέσεων ή θαλάμων και ειδικών πυλών στα σήραγγα .

Οι εγκολπώσεις στα σήραγγα χρησιμεύουν για την ασφάλεια σε περίπτωση κινδύνου των εργαζομένων, για συντήρηση των διαφόρων τμημάτων της σήραγγας καθώς και για γενικές εργασίες . Κατασκευάζονται σε αποστάσεις, το ανώτερο **50m** κατ' εναλλαγή και στις δύο πλευρές της σήραγγας . Επίσης, έχουν συνήθως εύρος **2.0** έως **2.50 m**, ύψος **1.90** έως **2.25 m** και βάθος γύρω στο **1.00 m** . Σε πολύ στερεό έδαφος δεν χρειάζεται καμιά επένδυση των εγκολπώσεων .

Σε μεγάλα σήραγγα εκτός από τις εγκολπώσεις κατασκευάζονται, σε απόσταση **1.00** έως **2.00 km**, μεγαλύτεροι θάλαμοι για την παραμονή εκεί, των εργατών και των μηχανημάτων . Οι θάλαμοι αυτοί έχουν εύρος **3.00 m** έως **5.00 m**, ύψος **2.80 m** έως **3.00 m** και βάθος **3.00 m** έως **8.00 m** .



Οι πύλες έχουν σαν σκοπό να προστατεύουν τα στόμια των σήραγγα από κατολισθήσεις μαζών πετρώματος καθώς και να κρατούν μακριά από την κορυφή το ρέον νερό της βροχής και τέλος να δίνουν στα στόμια αρχιτεκτονική ομορφιά .

Κατασκευαστικά διακρίνονται οι εξής βαθμίδες κατασκευής πυλών .

- Ø Σε πολύ σταθερά εδάφη το στόμιο μένει συχνά χωρίς τοίχωμα πύλης, όπου εδώ αρκεί το τοίχωμα του σήραγγα για προστασία .
- Ø Εάν υποθέτουμε κατολίσθηση μαζών ή υπάρχει η πιθανότητα να εισέρχονται οι σταγόνες της βροχής, τότε το στόμιο πρέπει να πιαστεί με ένα μετωπικό τοίχωμα, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα .
- Ø Εάν υπάρχει ο κίνδυνος κατολισθήσεων προς τα εμπρός, το τοίχωμα αυτό θα πρέπει να κατασκευασθεί σαν προστατευτικό .

