



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ:
«ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ»

ΣΧΟΛΕΣ: ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Σχεδιασμός Υπόγειου Χώρου Αποθήκευσης Πυρομαχικών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Βασιλάκης Νικόλαος

Επιβλέπων: Ανδρέας Μπενάρδος
Επικουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2014



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ:
«ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ»

ΣΧΟΛΕΣ: ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Σχεδιασμός Υπόγειου Χώρου Αποθήκευσης Πυρομαχικών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Βασιλάκης Νικόλαος

Επιβλέπων: Ανδρέας Μπενάρδος
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις 19/12/2014

Παύλος Νομικός, Επίκουρος Καθηγητής

Μαρία Μενεγάκη, Επίκουρη Καθηγήτρια

Ανδρέας Μπενάρδος, Επίκουρος Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ, ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2014

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζονται οι περιορισμοί που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό ενός υπόγειου χώρου αποθήκευσης πυρομαχικών, για την περίπτωση ατυχήματος. Ενδεχόμενη έκρηξη αποτελεί κίνδυνο για το προσωπικό, τα υλικά και τις κατασκευές που βρίσκονται τόσο εντός του υπόγειου χώρου όσο και στο εξωτερικό περιβάλλον, μέσω του αέριου ωστικού κύματος, των θραυσμάτων και των δονήσεων του εδάφους. Για το λόγο αυτό κατασκευάζονται εντός της υπογείου εγκατάστασης διάταξεις ασφαλείας, με σκοπό την αποτροπή εξάπλωσης της έκρηξης, ενώ στον εξωτερικό της εγκατάστασης χώρο υπολογίζονται αποστάσεις ασφαλείας για τις κατοικήσιμες κατασκευές, τις οδούς κυκλοφορίας κ.α. Ο σχεδιασμός κατασκευής ενός τέτοιου χώρου απαιτεί την ακριβή γνώση του προς αποθήκευση υλικού (είδος, ποσότητα κτλ). Ωστόσο προτείνονται τυπικές εγκαταστάσεις διαφόρων δυνατοτήτων αποθήκευσης, οι οποίες πληρούν τα κριτήρια ασφαλείας.

ABSTRACT

This thesis examines the constraints to be taken into account when designing an underground ammunition storage in case of an accident. Possible explosion is hazard to personnel, materials and structures located both underground and aboveground, through airblast, debris and ground shock. Therefore security measures and devices are constructed inside the underground facility in order to prevent the spreading of the blast, while aboveground safety distances are calculated for residential constructions, traffic routes etc. The construction design of such an area requires precise knowledge of storage material properties (type, quantity, etc.). However, drawings of typical underground facilities with different storage capacities, that meet the safety criteria, are available.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1. Εισαγωγή	1
2. Στρατιωτική Χρήση Υπόγειων Κατασκευών.....	3
2.1. Αρχαιότητα	3
2.2. Μεσαίωνας	5
2.3. 19 ^{ος} Αιώνας	5
2.4. Α' Παγκόσμιος Πόλεμος	6
2.5. Σύγχρονη Εποχή	7
2.6. Σήμερα	12
3. Υπόγεια Αποθήκευση Πυρομαχικών	13
3.1. Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Υπόγειας Αποθήκευσης Πυρομαχικών	14
3.1.1. Πλεονεκτήματα Υπόγειας Αποθήκευσης	14
3.1.2. Μειονεκτήματα Υπόγειας Αποθήκευσης	16
3.2. Underground Ammunition Facility (UAF) στην Σινγκαπούρη	17
4. Σχεδιασμός Υπόγειου Χώρου Αποθήκευσης Πυρομαχικών	21
4.1. Γενική Περιγραφή	21
4.2. Αρχές Σχεδιασμού Υπόγειου Χώρου Αποθήκευσης Πυρομαχικών	25
4.3. Επίδραση Έκρηξης Εντός Υπόγειου Χώρου	25
4.4. Τρόποι Περιορισμού των Κινδύνων της Έκρηξης	27
4.4.1. Σχεδιασμός Εγκατάστασης	27
4.4.2. Έξοδοι.....	27
4.4.3. Διακλαδώσεις Κύριας Σήραγγας.....	27
4.4.4. Μηχανισμοί Κλεισίματος.....	28
4.4.5. Θάλαμοι Αποτόνωσης.....	30
4.4.6. Στενώσεις.....	33
4.4.7. Παγίδες Θραυσμάτων.....	33
4.4.8. Παγίδες Έκρηξης.....	35
4.4.9. Οδόφραγμα Εξόδου.....	36
4.5. Αποστάσεις Ασφαλείας.....	38
4.5.1. Γενικά.....	38
4.5.2. Κίνδυνοι από την Έκρηξη.....	40
4.5.3. Απαραίτητες Αποστάσεις Ασφαλείας QD.....	41

4.5.4. Κατηγορίες Κινδύνου Πυρομαχικών – Εκρηκτικών.....	42
4.5.5. Απόσταση Μεταξύ των Θαλάμων.....	43
4.5.6. Απόσταση Κατοικήσιμων Κατασκευών (IBD).....	45
4.5.6.1. Υπολογισμός IBD για τους κινδύνους από το αέριο ωστικό κύμα.....	45
4.5.6.2. Υπολογισμός IBD για τους κινδύνους από τα θράυσματα.....	53
4.5.6.3. Υπολογισμός IBD για τους κινδύνους από τις εδαφικές δονήσεις.....	70
4.5.7. Απόσταση Δημόσιων Οδών Κυκλοφορίας (PTRD).....	76
5. Σχεδιασμός Υπόγειου Χώρου Πυρομαχικών για τις Ανάγκες των Ενόπλων Δυνάμεων.....	77
6. Συμπεράσματα.....	85
Βιβλιογραφικές Αναφορές	87
Κατάλογος Εικόνων.....	89

2. ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΗ ΧΡΗΣΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

2.1. Αρχαιότητα

Σύμφωνα με ιστορικές πηγές στις πολιορκίες πόλεων με τείχη στην αρχαιότητα χρησιμοποιούνταν η μέθοδος της εκσκαφής υπόγειων σηράγγων κάτω από τα τείχη της πόλης για την υπονόμηση τους. Η μέθοδος αυτή μπορούμε να πούμε ότι ήταν η πρώτη χρήση των υπογείων κατασκευών για στρατιωτικούς σκοπούς.

Ο Έλληνας ιστορικός Πολύβιος (203-120 π.Χ.) στο βιβλίο του "Ιστορίαι" (ή "Η Άνοδος της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας") [1] αναφέρει μία από τις πρώτες καταγεγραμμένες χρήσεις υπόγειων κατασκευών για στρατιωτικούς σκοπούς. Συγκεκριμένα κατά την πολιορκία της Αμβρακίας (σημερινή Άρτα) οι Ρωμαίοι έσκαψαν μία υπόγεια σήραγγα για να υπονομεύσουν τα τείχη της πόλης. Ο Πολύβιος επίσης αναφέρει και μία περίπτωση, (πολιορκία της Πρινασσού από τον Φίλιππο Ε' (238 – 179 π.χ.) βασιλιά της Μακεδονίας) κατά την οποία η εκσκαφή της σήραγγας δεν ήταν δυνατή με τα τότε διαθέσιμα μέσα, λόγω του βραχώδους υποβάθρου («ἀπράκτου τῆς ἐπιβολῆς αὐτῷ διὰ τὸ πετρῶδη τὸν τόπον») [2].

Τέτοιες πρακτικές χρησιμοποιήθηκαν και από άλλους λαούς, όπως οι Κινέζοι από την περίοδο των "Αντιμαχόμενων Κρατών" (475-221πΧ) [3].

Επίσης, οι υπόγειες εγκαταστάσεις είχαν και άλλες χρήσεις που σχετίζονται με στρατιωτικούς σκοπούς, όπως:

- Καταφύγια για την προστασία από επιδρομές, με σημαντικότερο παράδειγμα την υπόγεια πόλη Derinkuyu στην Καππαδοκία, όπου οι πρώτες εγκαταστάσεις χρονολογούνται από το 1.400π.Χ.

- Σήραγγες για την διαφυγή σημαντικών προσώπων από ακροπόλεις, οχυρώσεις πόλεων ή για την πρόσβαση εκτός των τειχών κατά την διάρκεια πολιορκίας.

- Ακόμα και ο σκοπός κατασκευής του Ευπαλίνειου Ορύγματος στην Σάμο (6^ο αιώνας π.Χ.) ήταν όχι μόνο να μεταφερθεί νερό από την πηγή πίσω από το βουνό προς το σημερινό Πυθαγόρειο, αλλά να γίνει με τρόπο που δεν θα ήταν ανιχνεύσιμο από τους επιδρομείς, ώστε να μην το καταστρέψουν και στερήσουν την πόλη από το νερό.

2.2. Μεσαίωνας:

στο μεσαίωνα η αγγλική λέξη «mine» σήμαινε μία σήραγγα που διανοίγονταν κάτω από τα τείχη των κάστρων ή άλλους είδους οχύρωσης. Η σήραγγα χρησίμευε είτε για την υπονόμηση των θεμελίων της οχύρωσης, είτε για την πρόσβαση των επιτιθέμενων εντός αυτής, ενώ η υποστήριξή της γίνονταν με ξύλινα υποστυλώματα – δοκάρια. Η υπονόμηση της οχύρωσης γίνονταν και με το γέμισμα της σήραγγας με εύφλεκτα υλικά (εκρηκτικά όπως πυρίτιδα αργότερα) και την έναυση φωτιάς, η οποία έκαιγε την ξύλινη υποστύλωση και οδηγούσε σε κατακρήμνιση της οροφής με αποτέλεσμα την πρόκληση βλαβών ή την καταστροφή της οχύρωσης.

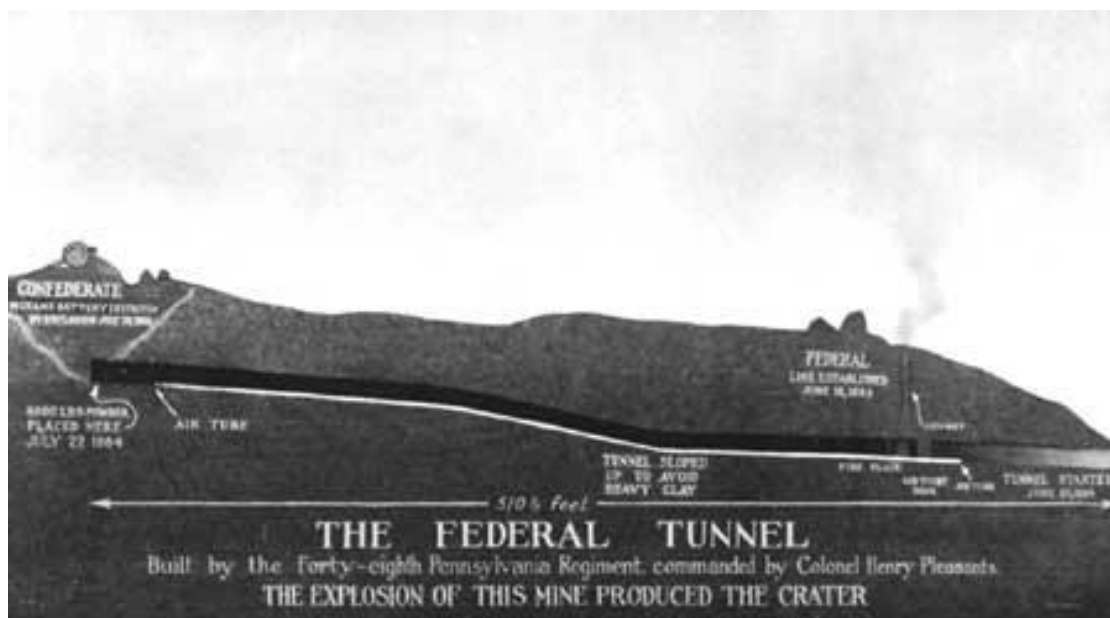
2.3. 19^{ος} Αιώνας:

Κατά την διάρκεια του Αμερικάνικου Εμφύλιου Πολέμου (1861-1865) βρίσκουμε ορισμένα παραδείγματα χρησιμοποίησης των υπογείων κατασκευών για πολεμικούς σκοπούς.

Στην πολιορκία του Vicksburg[4] τον Ιούνιο του 1863 οι επιτιθέμενες μονάδες των Βόρειων έσκαψαν σήραγγες κάτω από τις θέσεις των χαρακωμάτων των αμυνόμενων, τις οποίες γέμισαν με εκρηκτικά και πυροδότησαν προκαλώντας πολλές απώλειες στην εχθρό και δημιουργώντας έναν κρατήρα 12 διάμετρο και 3,7m βάθος που χρησίμευσε ως νέα θέση οχύρωσης.

Παρόμοιο γεγονός έλαβε χώρα και στην πολιορκία του Petersburg (1865). Η εκσκαφή της σήραγγας γίνονταν με φτυάρια, και η υποστήριξη της με ξύλινους δοκούς. Για τον αερισμό της σήραγγας τοποθετήθηκε σε όλο το μήκος της ένας ξύλινος αγωγός και κατασκευάστηκε ένα φρεάτιο αερισμού στη βάση του οποίου ήταν συνεχώς αναμμένη μία εστία φωτιάς. Η φωτιά ωθούσε τον αέρα έξω από το φρεάτιο με αποτέλεσμα να δημιουργείται ροή αέρα εντός της σήραγγας από τον ξύλινο αγωγό. Όταν η σήραγγα έφτασε στο επιθυμητό μήκος, δηλαδή κάτω από το στρατόπεδο του εχθρού, διανοίχθηκαν δύο σήραγγες κάθετες στην αρχική ώστε να σχηματίζουν ένα "T". Το τελικό μήκος της σήραγγας ήταν 156m με υπερκείμενα περίπου 15m αρχικά και 6m στο τέλος. Το άνοιγμα ήταν μικρό με

ύψος 1,4m και πλάτος 1m. Η σήραγγα γεμίστηκε με 3,5tn πυρίτιδας και όταν πυροδοτήθηκε δημιούργησε ένα κρατήρα 52x37m και βάθους 9m ενώ προκάλεσε την απώλεια περίπου 300 στρατιωτών. Η μάχη που ακολούθησε είναι γνωστή ως η Μάχη του Κρατήρα (Battle of the Crater) [5].



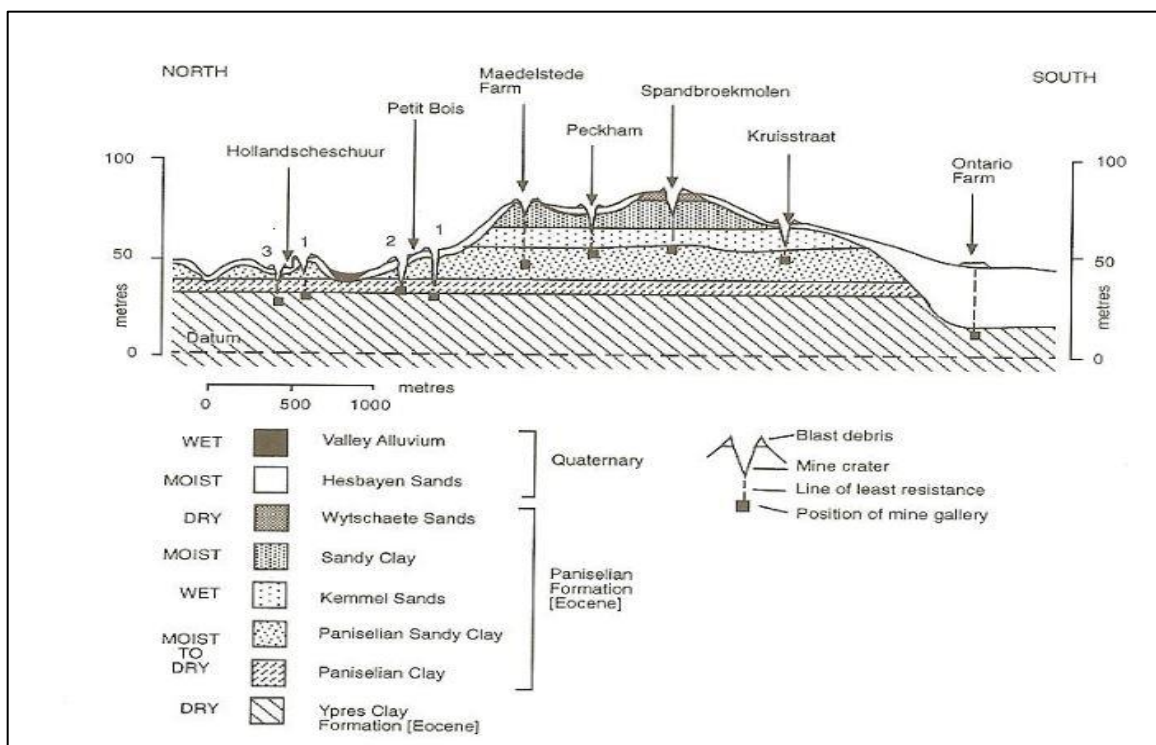
Εικόνα 2: Η σήραγγα που διανοίχθηκε στην πολιορκία του Petersburg (1865) κατά την διάρκεια του Αμερικάνικου Εμφύλιου Πολέμου.

2.4. Α' Παγκόσμιος Πόλεμος:

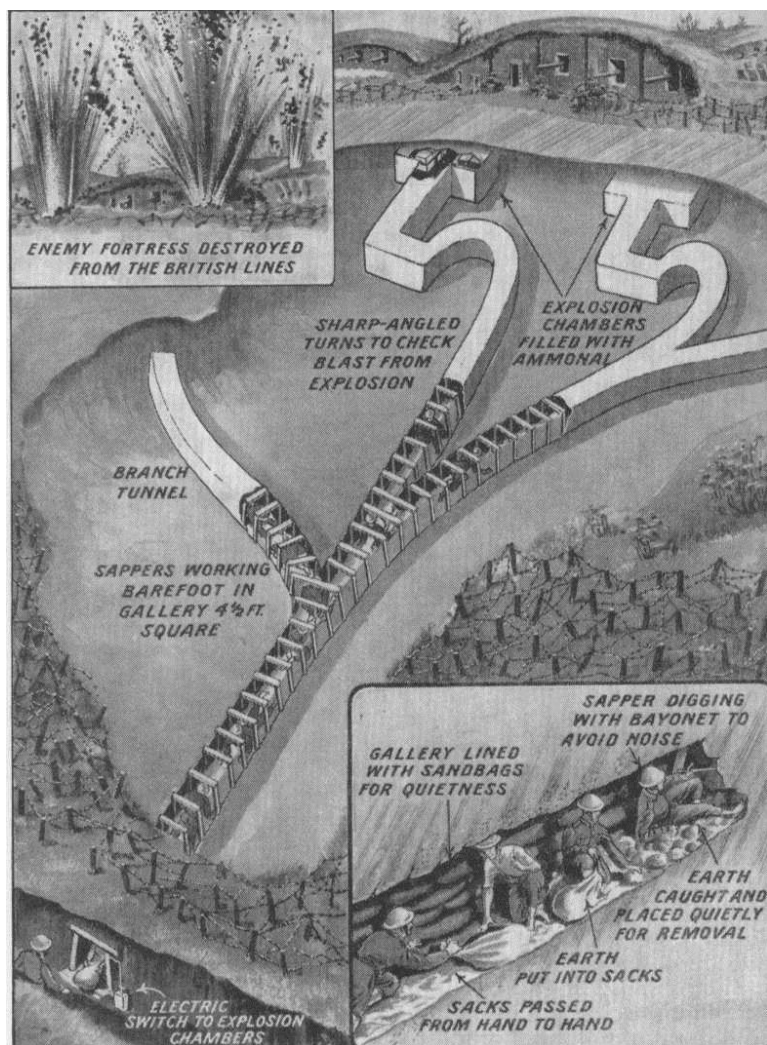
Στον Α' Παγκόσμιο Πόλεμο η χρήση των υπόγειων κατασκευών στις πολεμικές επιχειρήσεις γνώρισε μεγάλη άνθηση λόγω και του στατικού χαρακτήρα των εχθροπραξιών. Σε πολλές μάχες χρησιμοποιήθηκε η τακτική της διάνοιξης σήραγγας κάτω από το στρατόπεδο του εχθρού και η υπονόμησης της με εκρηκτικά. Για το λόγο αυτό είχαν δημιουργηθεί ειδικές μονάδες του σώματος μηχανικών τόσο στις συμμαχικές όσο και στις γερμανικές ένοπλες δυνάμεις (Royal Engineer Tunnelling Companies, Australian Tunnelling Company κ.α.)

Ένα σημαντικό παράδειγμα είναι η μάχη της Messines (1917) [6]. Ο Βρετανικός στρατός διάνοιξε ένα σύστημα σηράγγων ώστε να φτάσουν κάτω από τα Γερμανικά στρατεύματα. Η διάνοιξη έγινε σε σφιγρή άργιλο ("blueclay") και αντιμετωπίστηκε πρόβλημα υπογείων υδάτων γιαυτό απαιτήθηκε η συνδρομή γεωλόγων (μεταξύ των οποίων ο Edgeworth David). Το συνολικό μήκος των

σηράγγων ήταν 5,5km με υπερκείμενα από 24 έως 37m. Τελικά δημιουργήθηκαν 21 υπόνομοι που γέμισαν με 455tn αμμωνάλης (εκρηκτικό με βάση το TNT). Όταν πυροδοτήθηκαν εξερράγη οι 19 υπόνομοι προκαλώντας τεράστιες απώλειες στις Γερμανικές δυνάμεις. Η έκρηξη της Messines θεωρείται η μεγαλύτερη σχεδιασμένη έκρηξη μέχρι τότε στην ανθρώπινη ιστορία και η πιο θανατηφόρα μη πυρηνική έκρηξη έως σήμερα.



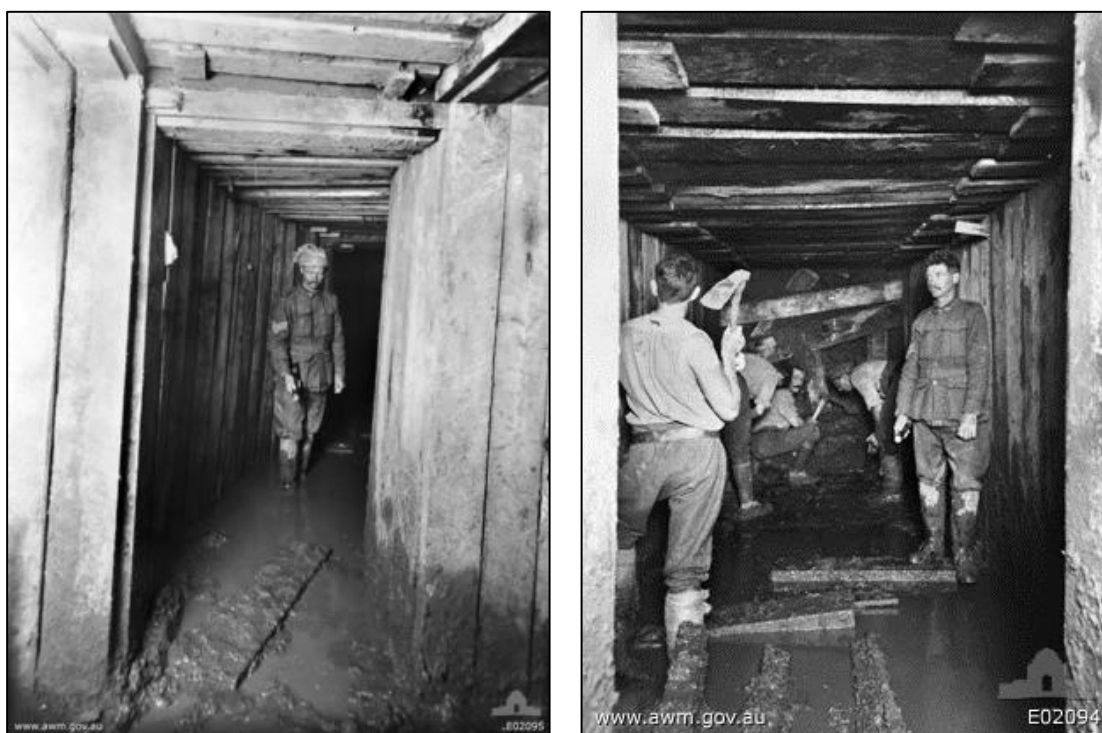
Εικόνα 3: Γεωλογική Τομή Σήραγγας που διανοίχθηκε στην μάχη της Messines (1917).



Εικόνα 4: Ζωγραφική αναπαράσταση της διάνοιξης σηράγγων κατά τη Μάχη της Messines (1917).

Στην Εικόνα 3 παρουσιάζεται μία ζωγραφική αναπαράσταση των σηράγγων που διανοίχθηκαν κατά τη μάχη της Messines. Παρατηρούμε ότι με σκοπό η έκρηξη να έχει το μεγαλύτερο επιθυμητό αποτέλεσμα και η ισχύς της να μην διαφύγει διαμέσου των σηράγγων προσέλευσης, στο τέλος κατασκευάστηκε μία στροφή 180° ακολουθούμενη από άλλη μία 90°. Οι μηχανισμοί αυτοί δεν επιτρέπουν την διαφυγή των καυσαερίων και οδηγούν την ισχύ της έκρηξης προς τα πάνω ώστε να προκαλέσουν μεγαλύτερη ζημία στις εχθρικές θέσεις. Παρόμοιες κατασκευές για τον έλεγχο των καυσαερίων χρησιμοποιούνται σήμερα στους υπόγειους χώρους αποθήκευσης πυρομαχικών, όπως θα αναλύσουμε παρακάτω, ώστε σε ενδεχόμενο ατύχημα – έκρηξη σε ένα θάλαμο να αποφευχθεί η μετάδοσή της σε γειτονικό θάλαμο.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η διάνοιξη των σηράγγων με τα τότε διαθέσιμα μέσα ήταν πολύ δύσκολη και χρονοβόρα. Για την αποφυγή εντοπισμού από τον εχθρό δεν χρησιμοποιούνταν μηχανήματα και η διάνοιξη γίνονταν με τα χέρια. Δεν υπήρχε η δυνατότητα χρήσης ηλεκτρικού ρεύματος και ο φωτισμός γίνονταν με κεριά. Η υποστήριξη γίνονταν με ξύλινους δοκούς και δεν χρησιμοποιούνταν καρφιά ή βίδες για την αποφυγή θορύβου. Συνήθως υπήρχαν προβλήματα υπογείων υδάτων αναγκάζοντας του εργάτες - στρατιώτες να δουλεύουν εντός του νερού. Σημαντικό πρόβλημα ήταν και ο αερισμός καθώς δεν υπήρχε η δυνατότητα διάνοιξης κάθετων φρεατίων αερισμού γιατί βρίσκονταν κοντά στις γραμμές του εχθρού. Αποτέλεσμα όλων αυτών ήταν οι μεγάλες απώλειες των ειδικών μονάδων διάνοιξης σηράγγων.



Εικόνα 5: Διάνοιξη σηράγγων στη μάχη της Messines

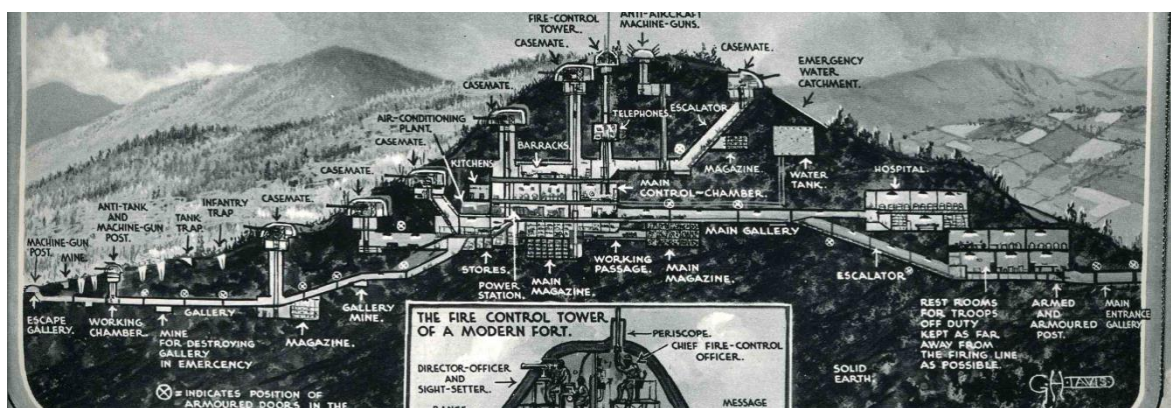
Παράλληλα επειδή στον Α' Παγκόσμιο Πόλεμο έγιναν οι πρώτες αεροπορικές προσβολές, ξεκίνησε η κατασκευή υπόγειων εγκαταστάσεων για διάφορες χρήσεις που σχετίζονται με τις πολεμικές επιχειρήσεις και που αργότερα θα γνωρίσουν μεγάλη άνθηση, όπως:

- Καταφύγια προφύλαξης πολιτών και στρατευμάτων.
- Κέντρα ελέγχου επιχειρήσεων.
- Χώροι αποθήκευσης πολεμικού υλικού.

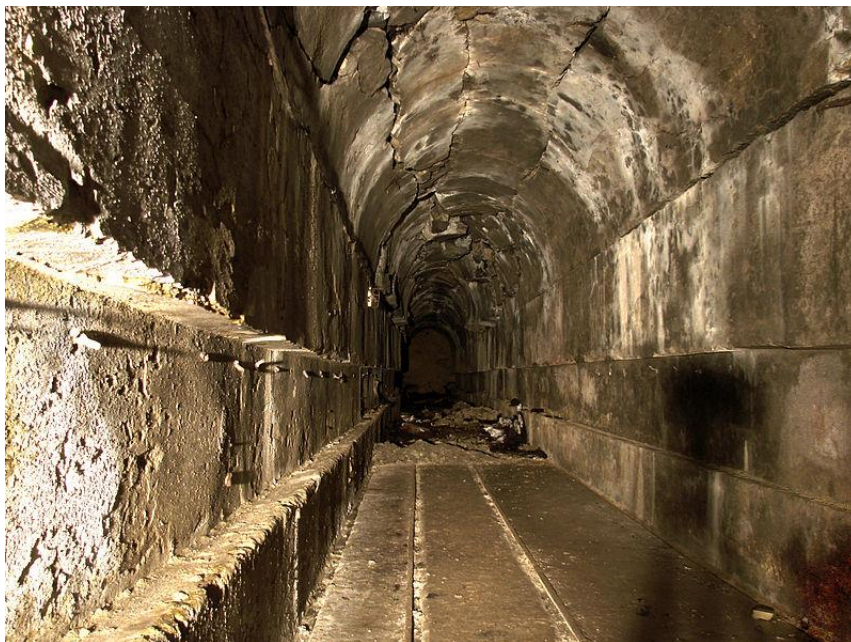
2.5. Σύγχρονη Εποχή:

Από τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο και μετά η τακτική της διάνοιξης σηράγγων και υπονόμησης του με εκρηκτικά δεν χρησιμοποιείται πλέον, λόγω της ταχύτερης εξέλιξης των πολεμικών επιχειρήσεων. Ωστόσο η χρήση υπόγειων εγκαταστάσεων μπαίνει σε νέα φάση και αφορά πλέον κυρίως την προετοιμασία των υποδομών και όχι την κατασκευή έργων κατά την διάρκεια των εχθροπραξιών.

Κατά την διάρκεια της προετοιμασία για τον Β' Π.Π. κατασκευάζονται σε όλη την Ευρώπη οχυρωματικά έργα σε μεγάλη κλίμακα. Τα έργα αυτά αποτελούνταν κυρίως από υπόγειες σήραγγες και περιελάμβαναν επιμέρους επίγεια οχυρά συγκροτήματα, με παρατηρητήρια, πυροβολεία, πολυβολεία κ.λ.π. Τα γνωστότερα είναι η Γραμμή Μαζινό στην Γαλλία με υπόγεια τούνελ μήκους 100km, η Γραμμή Siegfried (ή Δυτικό Τείχος) στην Γερμανία, και η Γραμμή Μεταξά στην Ελλάδα με συνολικό μήκος σηράγγων 24km και 13.000τμ υπόγειων καταφυγίων – θαλάμων. Αλλά και κατά την διάρκεια του πολέμου κατασκευάζονται υπόγεια έργα. Το 1943 οι Γερμανοί υπό τον φόβο των συμμαχικών αεροπορικών βομβαρδισμών αποφασίζουν να μεταφέρουν την παραγωγή των πρώτων στον κόσμο βαλλιστικών πυραύλων μεγάλου βεληνεκούς (V-2) σε υπόγεια εγκατάσταση κοντά στο Nordhausen.



Εικόνα 6: Σχηματική αναπαράσταση τομής στην γραμμή Μαζινό.



Εικόνα 7: Υπόγεια σήραγγα στην γραμμή Μαζινό. Οι βλάβες προκλήθηκαν από δοκιμές εκρηκτικών από τις Γερμανικές δυνάμεις εντός των σηράγγων μετά την κατάληψη της Γαλλίας.

Παράλληλα και εκτός Ευρώπης γίνονται μεγάλα υπόγεια οχυρωματικά έργα. Στον Β΄ Σινοϊαπωνικό Πόλεμο (1937-1945) η χρήση των σηράγγων και υπόγειων καταφυγίων από τους Κινέζους είναι τόσο έντονη ώστε για πρώτη φορά χρησιμοποιήθηκε ο όρος “Tunnel War” ή “Tunnel Warfare”. Στην μάχη της Iwojima οι Ιάπωνες υπερασπίστηκαν το νησί μέσω ενός συστήματος υπόγειων σηράγγων μήκους 18km, προκαλώντας πολλές απώλειες στις Αμερικανικές Δυνάμεις.

Στον πόλεμο της Κορέας (1950-1953) η χρήση των υπόγειων εγκαταστάσεων στις πολεμικές επιχειρήσεις έφτασε σε πρωτοφανή επίπεδα. Το δίκτυο των κατασκευασμένων σηράγγων ήταν 500km ενώ κατασκευάστηκαν υπόγεια καταφύγια σε βάθος 80-100m ώστε να προφυλάσσουν ακόμα και από πυρηνικό πλήγμα. Παρόμοιες τακτικές χρησιμοποιήθηκαν από τους αμυνόμενους στον Πόλεμο του Βιετνάμ με συνολικό μήκος υπόγειων σηράγγων πάνω από 200km.

Η κατασκευή υπόγειων στρατιωτικών εγκαταστάσεων συνεχίζεται και αυξάνεται κατά την διάρκεια του Ψυχρού Πολέμου (1947-1989). Δύο είναι τα υπόγεια έργα που κυριαρχούν αυτή την περίοδο: τα σιλό πυραυλικών συστημάτων και τα καταφύγια για την προστασία της ηγεσίας.

2.6. Σήμερα

Οι στρατιωτικές επιχειρήσεις σήμερα έχουν αλλάξει μορφή σε σχέση με το παρελθόν, τόσο λόγω των δυνατοτήτων των νέων οπλικών συστημάτων και την εξέλιξη της αεροπορίας σε ρυθμιστή, όσο και λόγω της επιθυμίας μείωσης των απωλειών σε έμφυχο δυναμικό. Οι θεωρητικοί του πολέμου υποστηρίζουν τα πλεονεκτήματα ευέλικτων δυνάμεων μικρότερου μεγέθους και υψηλής ετοιμότητας και ισχύος πυρός που διεξάγουν Πόλεμο Ελιγμών (Maneuver Warfare) σε σχέση με το παλιό παραδοσιακό μοντέλο του ευμεγέθους στρατεύματος το οποίο θα εμπλακεί σε Πόλεμο Φθοράς (Attrition Warfare). Στον Πόλεμο Φθοράς η νίκη επιτυγχάνεται προκαλώντας στον εχθρό ένα υψηλότερο ποσοστό απωλειών/θυμάτων, ή ευρύτερα ένα «ποσοστό φθοράς». Αυτό σημαίνει ότι όπου ο εχθρός είναι ισχυρός στέλνεις τις περισσότερες δυνάμεις σου. Αντίθετα στον Πόλεμο Ελιγμών προσπαθείς να νικήσεις αχρηστεύοντας τα κέντρα βαρύτητας του αντιπάλου μέσω αιφνιδιαστικών στοχευμένων χτυπημάτων που θα προκαλέσουν σοκ και αποδιοργάνωση (shock and disruption) [7]. Τα στοχευμένα χτυπήματα γίνονται συνήθως με αεροπορικές προσβολές ή από ειδικά εκπαιδευμένες δυνάμεις του στρατού και αφορούν κυρίως στις παρακάτω εγκαταστάσεις [8]:

- Κέντρα λήψης αποφάσεων / επιχειρήσεων
- Αεροπορικές Βάσεις
- Κέντρα επιμελητείας υλικών (logistics)
- Χώρους αποθήκευσης οπλικών συστημάτων ή πυρομαχικών

Η σημαντικότητα της προστασίας των υπόψη εγκαταστάσεων αυξάνεται αν στις ενδεχόμενες απειλές προσθέσουμε και την τρομοκρατία. Οι εγκαταστάσεις που αναφέρθηκαν ανωτέρω αποτελούν πρωτεύοντες στόχους τρομοκρατικών δυνάμεων και η τοποθέτηση τους υπόγεια περιορίζει (έως και αποκλείει) την δυνατότητα προσβολής τους.

Από τα ανωτέρω είναι κατανοητό ότι πλέον στις στρατιωτικές επιχειρήσεις είναι σημαντικότερο η προστασία των ανωτέρω στόχων. Για το λόγο αυτό τα υπόγεια έργα τις τελευταίες δεκαετίες έχουν πολύ μεγάλη ανάπτυξη στις υποδομές των ενόπλων δυνάμεων παγκοσμίως. Υπόγειες στρατιωτικές εγκαταστάσεις κατασκευάζονται πλέον σε πολύ μεγάλα βάθη, γίνονται όλο και μεγαλύτερες και έχουν μεγάλη στρατηγική σημασία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

3. ΥΠΟΓΕΙΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΠΥΡΟΜΑΧΙΚΩΝ

Στο προηγούμενο κεφάλαιο είδαμε ότι σήμερα υπάρχει αυξημένη αναγκαιότητα τοποθέτησης σημαντικών στρατιωτικών υποδομών σε υπόγειες εγκαταστάσεις. Μία από αυτές τις υποδομές είναι οι αποθήκες πυρομαχικών.

Ως πυρομαχικά νοούνται τα πάσης φύσεως εφόδια βολής, ιδίως τα φυσίγγια πολεμικών τυφεκίων, αυτόματων, πολυβόλων, πιστολιών και περιστρώφων, τα βλήματα βαρέων όπλων και πυροβολικού, καθώς και τα συστήματα, που αποτελούνται από εκρηκτικές ύλες, εκρηκτικούς μηχανισμούς ή συνδυασμούς αυτών, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν όπως είναι ή να βληθούν με όπλα ευθυτενούς ή καμπύλης τροχιάς. Στην έννοια των πυρομαχικών περιλαμβάνονται και τα ενεργά επί μέρους στοιχεία αυτών (καψύλια, κάλυκες, βολίδες, βραδύκαυστα υλικά κ.λπ.), καθώς και τα φυσίγγια βλαπτικών χημικών ουσιών¹.

Τα πυρομαχικά είναι αναλώσιμα υλικά απαραίτητα για την λειτουργία όλων των οπλικών συστημάτων. Είναι φανερό ότι δεν είναι δυνατή η αποθήκευση όλων των πυρομαχικών δίπλα στα οπλικά συστήματα που τα βάλουν ή στις βάσεις των οπλικών συστημάτων (αεροδρόμια, βάσεις τεθωρακισμένων κτλ), κυρίως για λόγους ασφαλείας αλλά και αποθηκευτικής δυνατότητας. Συνεπώς δημιουργούνται αποθηκευτικοί χώροι πυρομαχικών, οι οποίοι περιλαμβάνουν τα αποθέματα των στρατευμάτων. Τα πυρομαχικά αποτελούν τμήμα της Διαχείρισης Εφοδιαστικής Αλυσίδας που σχεδιάζει, υλοποιεί και ελέγχει την αποδοτική και αποτελεσματική κανονική και αντίστροφη ροή και αποθήκευση των υλικών και των σχετικών πληροφοριών από το σημείο προέλευσης τους έως το σημείο χρησιμοποίησής τους.

¹ ΝΟΜΟΣ 2168/93 (ΦΕΚ 147/Α/3-9-93) Ρύθμιση θεμάτων που αφορούν όπλα, πυρομαχικά, εκρηκτικές ύλες, εκρηκτικούς μηχανισμούς και άλλες διατάξεις.

3.1. Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Υπόγειας Αποθήκευση Πυρομαχικών

Η επιλογή κατασκευής ενός υπόγειου χώρου αποθήκευσης πυρομαχικών αντί ενός συμβατικού υπέργειου είναι μία πολύπλοκη διαδικασία κατά την οποία πρέπει να ληφθούν υπόψη οι παρακάτω παράγοντες:

3.1.1. Πλεονεκτήματα Υπόγειας Αποθήκευσης

1. **Προστασία** των εγκαταστάσεων και των δραστηριοτήτων που φιλοξενούν. Τα υπόγεια έργα υπερτερούν έναντι των συμβατικών καθώς λόγω της κάλυψης από τα υπερκείμενα υπόκεινται σε μικρότερες ζημιές από αεροπορικές προσβολές. Ειδικά στην σημερινή εποχή που όλες οι πολεμικές εχθροπραξίες ξεκινούν από την Αεροπορία και οι βομβαρδισμοί σημαντικών στόχων είναι προτεραιότητα, η υπόγεια αποθήκευση πυρομαχικών προσφέρει ένα σημαντικό πλεονέκτημα.

2. **Απόκρυψη των δραστηριοτήτων** που πραγματοποιούνται εντός της υπόγειας εγκατάστασης. Τα υπόγεια έργα όχι μόνο προσφέρουν προστασία στις δραστηριότητες που φιλοξενούν αλλά επιπλέον τις αποκρύπτουν από την εχθρική κατασκοπία. Όταν ολοκληρωθεί ένα υπόγειο έργο είναι πολύ δύσκολο να εξακριβωθεί η φύση της εγκατάστασης. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί ειδικές τεχνικές εύρεσης των υπόγειων εγκαταστάσεων και χαρακτηρισμού των δραστηριοτήτων που στεγάζουν (Happer, 1999 & Sepp, 2000).

3. **Απόκρυψη τις ακριβούς τοποθεσίας** στην οποία έχει κατασκευαστεί ο αποθηκευτικός χώρος. Στα υπόγεια έργα το μόνο εμφανές τμήμα είναι η είσοδος ενώ η εγκατάσταση μπορεί να έχει κατασκευαστεί πολύ μακριά από το μέρος της εισόδου και βέβαια σε άγνωστο βάθος.

Για την ισχυροποίηση των ανωτέρω στις παρακάτω εικόνες φαίνονται δύο εγκαταστάσεις αποθήκευσης πυρομαχικών, η μία υπέργεια και η άλλη υπόγεια. Είναι φανερό ότι παρόλο που οι αποθηκευτικοί χώροι στην υπέργεια εγκατάσταση είναι καλυμμένοι με εδαφικά υλικά για απόκρυψη, αποτελούν ξεκάθαρο στόχο για τα εχθρικά βομβαρδιστικά ή ακόμα και για δολιοφθορά από επίγειες δυνάμεις.

Ιδιαίτερα σήμερα με την ανάπτυξη των δορυφορικών παρακολουθήσεων ο εντοπισμός και η στόχευση τέτοιων εγκαταστάσεων με βαλλιστικούς πυραύλους είναι ιδιαίτερα εύκολη. Αντίθετα από την υπόγεια εγκατάσταση ξεχωρίζουν μόνο οι είσοδοι ενώ δεν διακρίνονται ο ακριβής τόπος, το βάθος αλλά και η δραστηριότητα που φιλοξενεί.



Εικόνα 8: Το Hawthorne Army Depot (HWAD) στην Νεβάδα των Ηνωμένων Πολιτειών, η μεγαλύτερη στον κόσμο βάση αποθήκευσης πυρομαχικών.



Εικόνα 9: Kirtland Underground Munitions Storage Complex στο Νέο Μεξικό των ΗΠΑ, η μεγαλύτερη αποθήκη πυρηνικών όπλων των Αμερικάνικων Ένοπλων Δυνάμεων.

4. **Απελευθέρωση εκτάσεων** για την χρησιμοποίηση τους σε άλλους σκοπούς, καθώς η απαίτηση γης από τις υπόγειες εγκαταστάσεις αφορούν μόνο τις εισόδους.

5. **Ασφάλεια.** Η φύλαξη μίας υπόγειας εγκατάστασης είναι ευκολότερη καθώς οι εισοδοί – προσβάσεις είναι περιορισμένες.

6. Ο **έλεγχος των επιπτώσεων ενός ατυχήματος** (έκρηξης) είναι ευκολότερος καθώς με ειδικές κατασκευαστικές διατάξεις μπορεί να αποφευχθεί η επέκταση της έκρηξης από τον ένα θάλαμο στον άλλο. Αντίθετα σε υπέργεια αποθήκευση μία έκρηξη μπορεί ευκολότερα να προκαλέσει την πυροδότηση γειτονικών χώρων αποθήκευσης (ανάλογα με τον κατασκευαστικό τύπο και τις αποστάσεις διαχωρισμού).

7. Η **θερμοκρασία** σε ένα υπόγειο χώρο παραμένει σταθερή που είναι πιο ευνοϊκό για την χημική σταθερότητα των πυρομαχικών.

8. Αποφεύγονται οι **κλιματικές αλλαγές - φαινόμενα**, όπως η βροχή, το χιόνι και τον πάγο, που μπορούν να προκαλέσουν δυσκολίες στην υπέργεια αποθήκευση.

9. **Μικρότερο κόστος συντήρησης** των υπόγειων εγκαταστάσεων σε σχέση με τις υπέργειες.

3.1.2. Μειονεκτήματα Υπόγειας Αποθήκευσης

1. Το **κόστος κατασκευής** ενός υπόγειου χώρου αποθήκευσης είναι μεγαλύτερο ενώ πρέπει να υπολογιστεί και το κόστος του ειδικού εξοπλισμού που απαιτείται. Ωστόσο επειδή όπως προαναφέρθηκε το κόστος συντήρησης είναι μικρότερο πρέπει να διερευνηθεί η συνολική δαπάνη σε όλο τον κύκλο ζωής του έργου.

2. Υπάρχουν **περιορισμοί στην επιλογή της τοποθεσίας** κατασκευής του χώρου αποθήκευσης λόγω της γεωλογίας της περιοχής.

3. Η **αυξημένη υγρασία** που μπορεί να επικρατεί στον υπόγειο χώρο προκαλεί αλλοίωση των αποθεμάτων ή της συσκευασίας τους. Πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στον έλεγχο της υγρασίας ειδικά σε χώρους όπου αποθηκεύονται πολύτιμα ή ευαίσθητα υλικά.

4. Ίσως απαιτηθεί η προμήθεια ή η κατασκευή **ειδικών οχημάτων / μηχανημάτων** για την μεταφορά και φόρτωση των πυρομαχικών.

3.2. Underground Ammunition Facility (UAF) στη Σιγκαπούρη

Το πιο πρόσφατο παράδειγμα κατασκευής υπόγειου χώρου αποθήκευσης πυρομαχικών αποτελεί το Underground Ammunition Facility (UAF) στη Σιγκαπούρη. Η κατασκευή του όχι μόνο ακολούθησε όλες τις προδιαγραφές αποθήκευσης πυρομαχικών αλλά αποτέλεσε τη βάση για την αναθεώρηση – επικαιροποίηση των προδιαγραφών αυτών.

Η ανάγκη για ένα τέτοιο υπόγειο χώρο προέκυψε από την εκτεταμένη ζήτηση για την κάλυψη των στεγαστικών αναγκών της χώρας. Ο υπάρχων χώρος αποθήκευσης πυρομαχικών, το Seletar East Ammo Depot, έπρεπε να μετακινηθεί ώστε ο χώρος να χρησιμοποιηθεί από την πολιτεία για μη στρατιωτικές χρήσεις. Τότε ξεκίνησε η έρευνα για την δυνατότητα κατασκευής ενός υπόγειου χώρου αποθήκευσης.

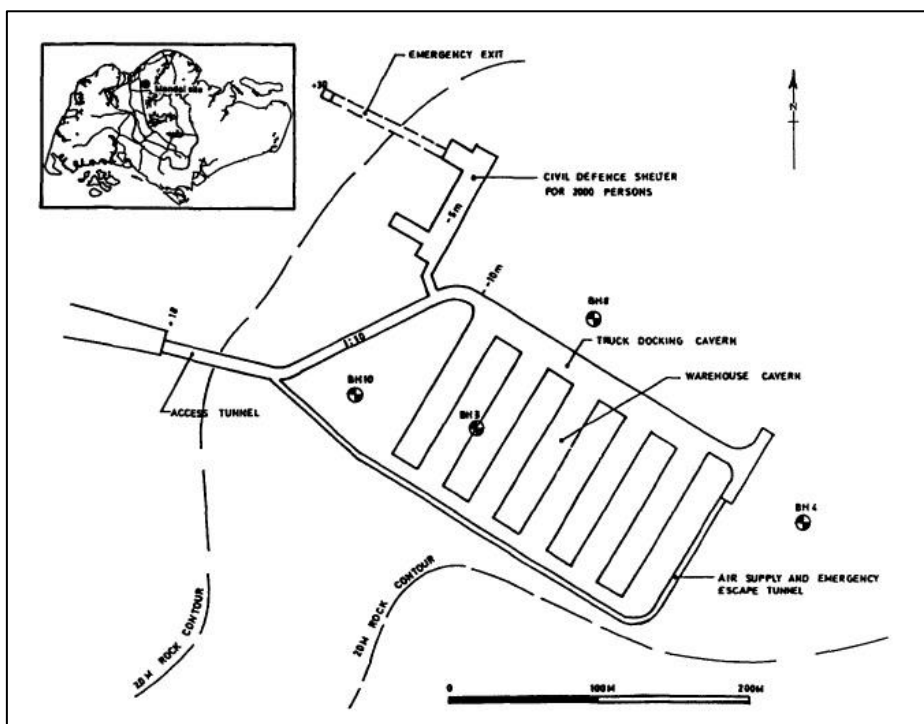
Το ένα τρίτο περίπου του εδάφους της Σιγκαπούρης καλύπτεται από ένα γρανιτικό σχηματισμό (Bukit Timah granite), ο οποίος στα τελευταία τριάντα χρόνια αποτελούσε της κύρια πηγή για τις κατασκευαστικές ανάγκες της χώρας. Ωστόσο τώρα τα περισσότερα λατομεία έχουν σταματήσει να λειτουργούν. Σύμφωνα με τον Broms (1989) αυτός ο γρανιτικός σχηματισμός είναι ιδανικός την υπόγεια ανάπτυξη.

Τελικά επιλέχθηκε το παλαιό λατομείο Mandai, ενώ για την καταλληλότητα της περιοχής πραγματοποιήθηκαν γεωφυσικές έρευνες με σεισμικές και γεωηλεκτρικές μεθόδους καθώς και 11 γεωτρήσεις (Wallaceetal, 1993, Leeetal. 1993). Ο γρανιτικός σχηματισμός στο Mandaiείναι κατάλληλος για την ανάπτυξη υπόγειων έργων καθώς έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά (Zhaoetal. 1994):

- Μέση αντοχή σε μονοαξονική θλίψη 190Μρα.

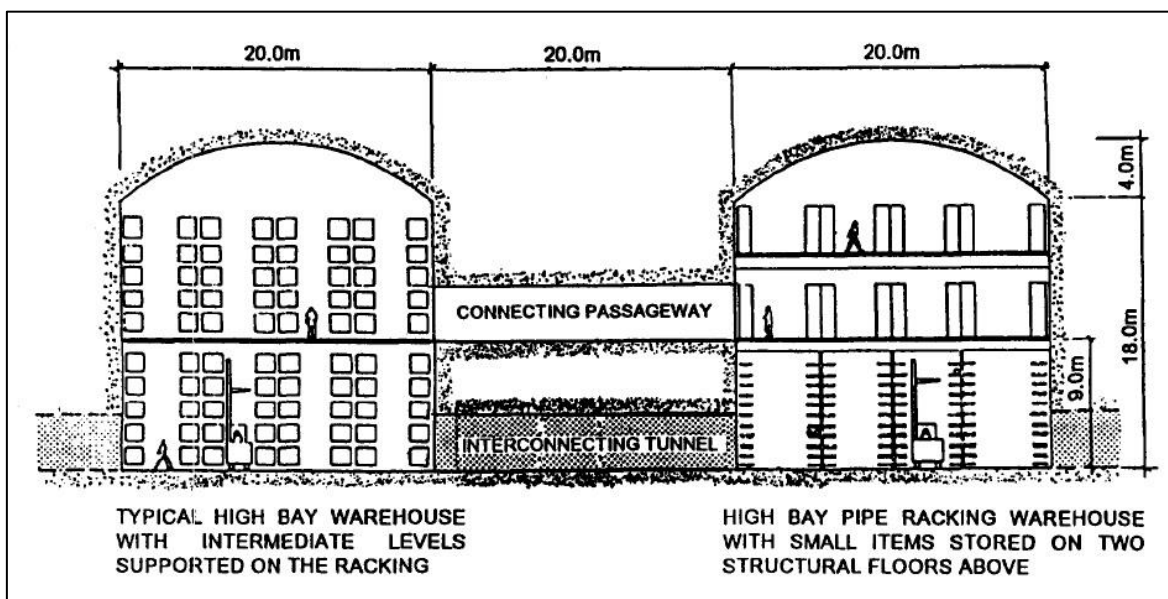
- Πολύ χαμηλή υδατοπερατότητα από 10^{-7} έως 10^{-9} m/s.
- Η αποσάθρωση (weathering) μπορεί να είναι εκτεταμένη αλλά το μέσο βάθος της δεν ξεπερνά τα 30m.
- Οι διευθύνσεις των υφιστάμενων ρηγμάτων και των κύριων οικογενειών ασυνεχειών δεν δημιουργούν προβλήματα στην διάνοιξη.
- Η ποιότητα του γρανίτη βάση του συστήματος κατάταξης Q (NGI) κυμαίνεται από 10 – 400 (Good to ExtremelyGood).

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται σχεδιαγραμματικά η κάτοψη του υπόγειου χώρου Wallace et al. 1995). Αποτελείται από πέντε παράλληλους θαλάμους 118m μήκους, 20m πλάτους και 22m ύψους, οι οποίοι συνδέονται με ένα θάλαμο διαστάσεων 210x18x8,4m για την κίνηση φορτηγών και την φόρτωση των πυρομαχικών. Η σήραγγα προσέγγισης διατομής 45m^2 έχει μήκος 225m και με κλίση 1:8 οδηγεί από την είσοδο στον θάλαμο φόρτωσης. Επίσης, έχει κατασκευαστεί μία σήραγγα αερισμού που λειτουργεί και ως έξοδος κινδύνου, διατομής 15m^2 , η οποία συνδέει την σήραγγα προσέγγισης με το άλλο άκρο του θαλάμου φόρτωσης. Οι θάλαμοι αποθήκευσης συνδέονται μεταξύ τους με δέκα κάθετες στους θαλάμους σήραγγες διατομής 12m^2 (δεν διακρίνονται στο σχεδιάγραμμα). Ο όγκος των εκσκαφών του συγκροτήματος ήταν περίπου 270.000m^3 ενώ ο όγκος του διαθέσιμου αποθηκευτικού χώρου είναι 210.000m^3 .

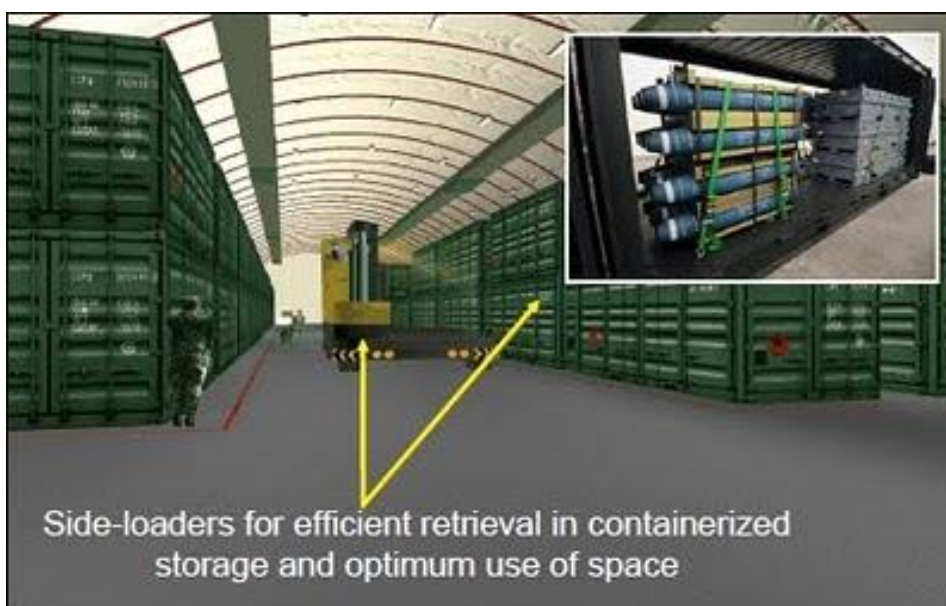


Εικόνα 10: Κάτοψη του υπόγειου χώρου αποθήκευσης πυρομαχικών (UAF).

Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχεδιάγραμμα η αποθήκευση των πυρομαχικών στους θαλάμους γίνεται σε δύο ή τρία επίπεδα. Το πρώτο επίπεδο που αποτελεί και τον κύριο αποθηκευτικό χώρο είναι εξοπλισμένο με κοντέινερ ειδικού τύπου ύψους 9m με δυνατότητα φόρτωσης από το πλάι. Για τη μεταφορά και φόρτωση χρησιμοποιούνται ειδικά μηχανήματα για κίνηση σε στενούς διαδρόμους και με δυνατότητα πλαϊνής φόρτωσης. Τα ανώτερα επίπεδα χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση υλικών μικρότερου όγκου / βάρους.

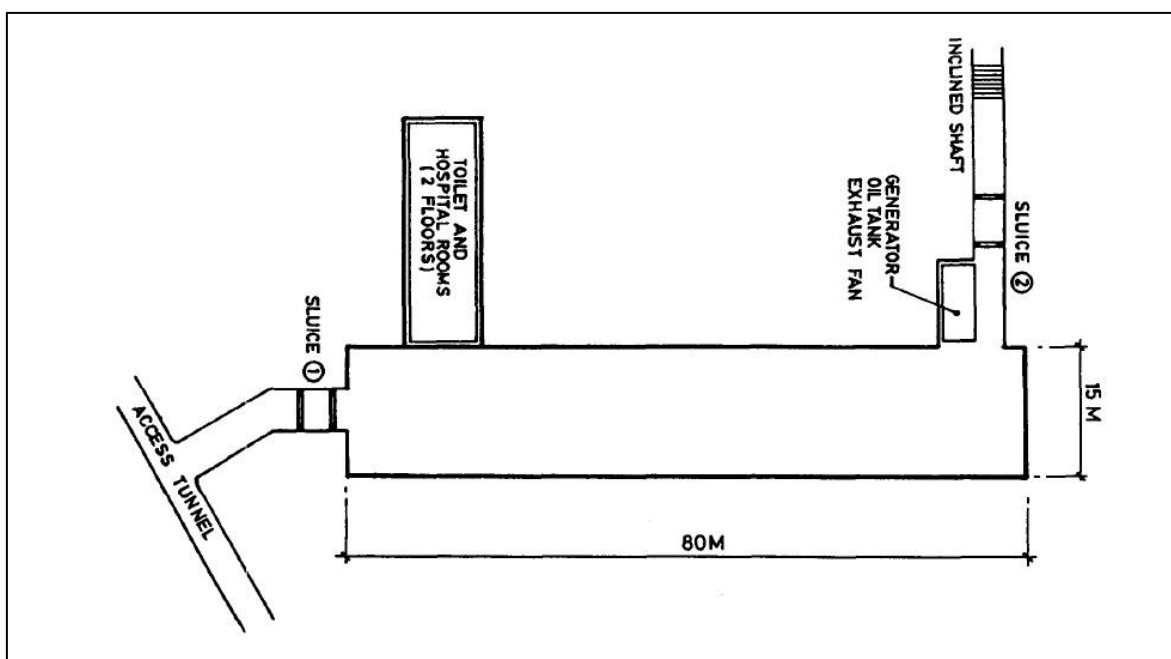


Εικόνα11: Σχηματική τομή των θαλάμων αποθήκευσης πυρομαχικών στο UAF.



Εικόνα 12: Τρόπος φόρτωση υλικών.

Η κατασκευή ολοκληρώθηκε με την δημιουργία ενός καταφυγίου χωρητικότητας 2.000 ατόμων. Ο θάλαμος είναι μήκους 80m, πλάτους 15m και ύψους 8m. Η είσοδος γίνεται από τη σήραγγα προσέγγισης του αποθηκευτικού χώρου ενώ έχει κατασκευαστεί και ένα φρεάτιο για χρήση ως έξοδος κινδύνου. Ο όγκος των εκσκαφών ήταν περίπου 9.600m³ που παρέχουν διαθέσιμο χώρο 4,8m³/άτομο. Κατά την ειρηνική περίοδο το καταφύγιο μπορεί να χρησιμοποιείται τόσο για την αποθήκευση υλικών αλλά και ως χώρος αθλητικών και πολιτιστικών εκδηλώσεων.



Εικόνα 13: Το καταφύγιο προσωπικού στο UAF

Το συνολικό κόστος της κατασκευής ανήλθε σε περίπου 38εκ€ που αντιστοιχεί σε 175€/m³ χώρου αποθήκευσης και 875€/άτομο για το καταφύγιο. Οι εργασίες ολοκληρώθηκαν εντός 2 ετών ενώ το χρονοδιάγραμμα προέβλεπε 20 μήνες.

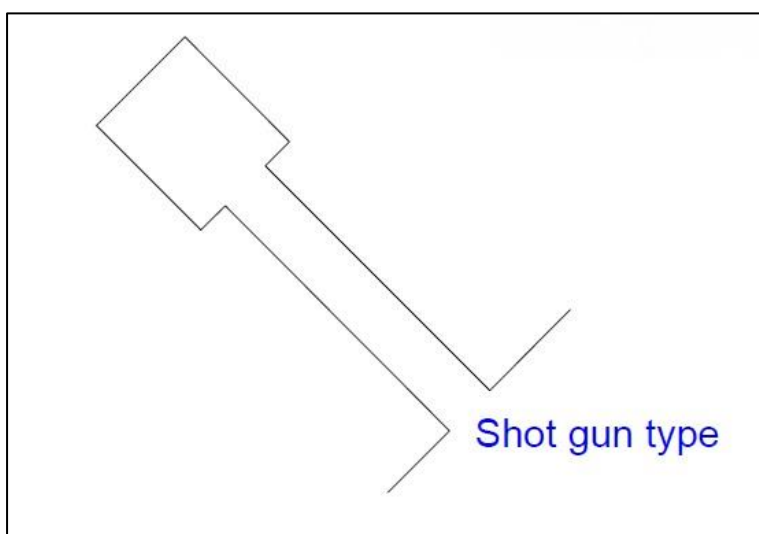
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

4. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΧΩΡΟΥ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΠΥΡΟΜΑΧΙΚΩΝ

4.1. Γενική Περιγραφή

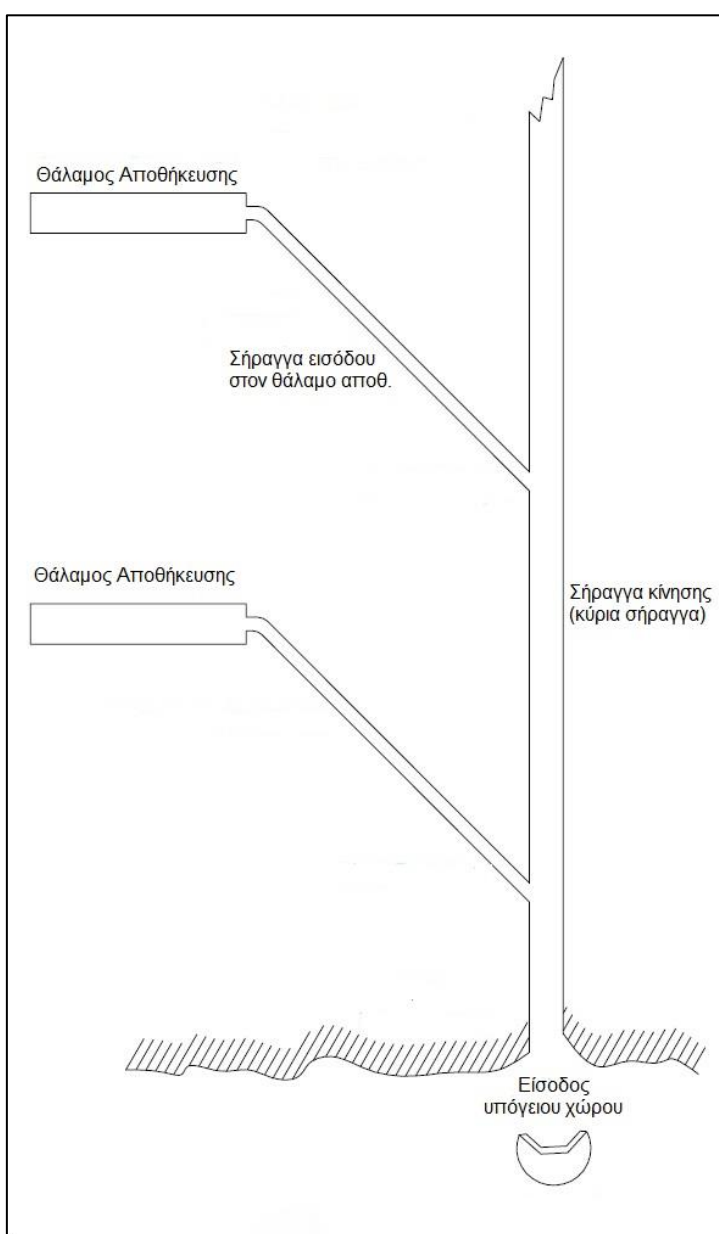
Οι υπόγειοι χώροι αποθήκευσης πυρομαχικών μπορεί να αποτελούνται από ένα θάλαμο ή από μία σειρά συνδεδεμένων θαλάμων. Οι θάλαμοι μπορεί να είναι είτε κατασκευασμένοι ή φυσικές γεωλογικές κοιλότητες του υπεδάφους. Ο αριθμός των θαλάμων εξαρτάται τόσο από τις απαιτήσεις αποθήκευσης όσο και από τις επικρατούσες τοπογραφικές και γεωλογικές συνθήκες και τους περιορισμούς ασφαλείας για τον περιβάλλοντα υπέργειο χώρο της εγκατάστασης.

Στα κάτωθι σχεδιαγράμματα παρουσιάζονται γενικές κατόψεις διάφορων πιθανών διαμορφώσεων μίας υπόγειας εγκατάστασης. Στην περίπτωση ενός θαλάμου αποθήκευσης η συνήθης διαμόρφωση φαίνεται στην Εικόνα 14. Αποτελείται από μία σήραγγα εισόδου που καταλήγει στον θάλαμο αποθήκευσης. Λόγω του σχεδιασμού, σε ενδεχόμενο ατύχημα τα προϊόντα της έκρηξης (αέριο ωστικό κύμα και εκτοξευόμενοι λίθοι) διαχέονται απευθείας στον περιβάλλοντα χώρο και για το λόγο αυτό ονομάζεται Shot GunType.

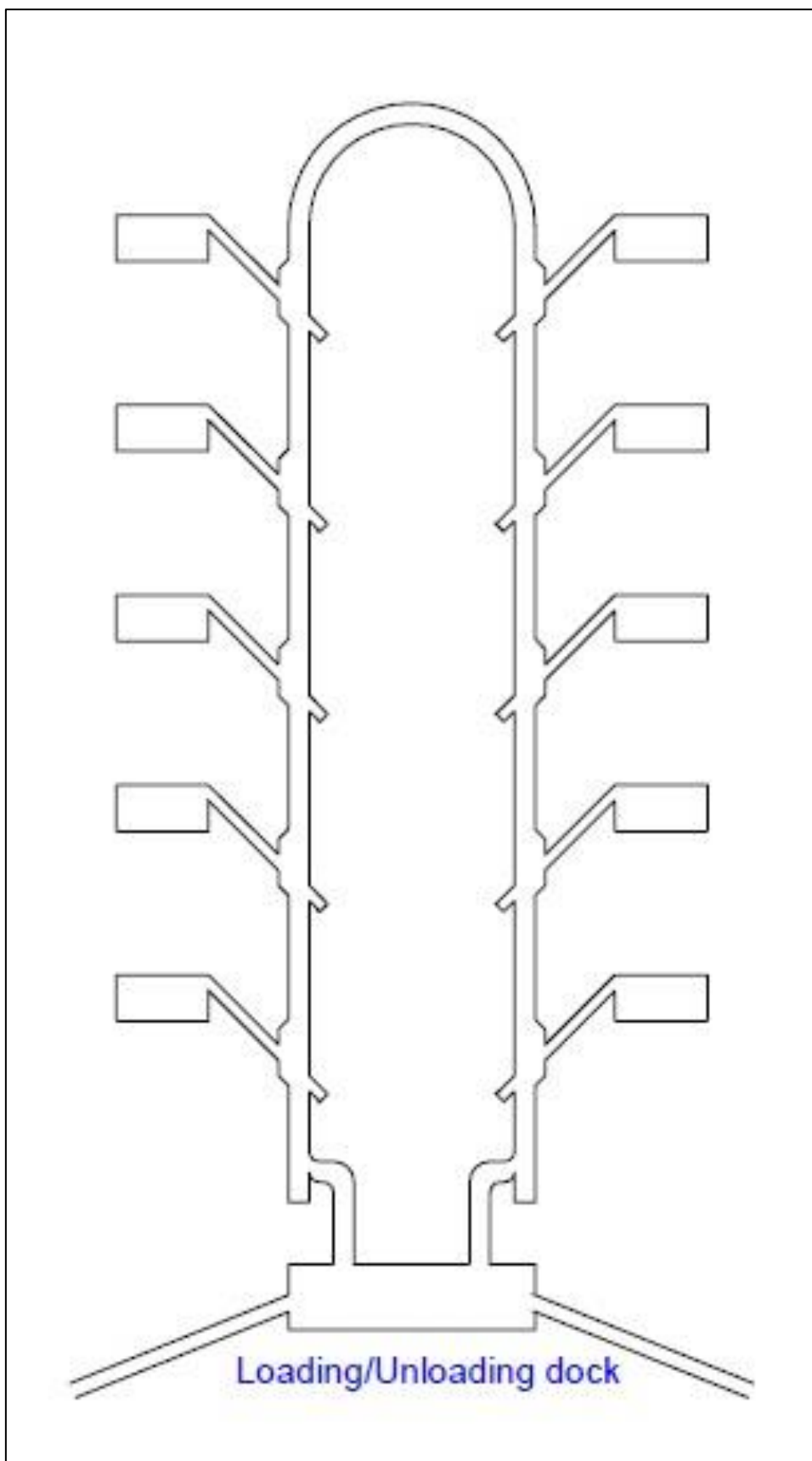


Εικόνα 14: Υπόγειος χώρος αποθήκευσης πυρομαχικών ενός θαλάμου.

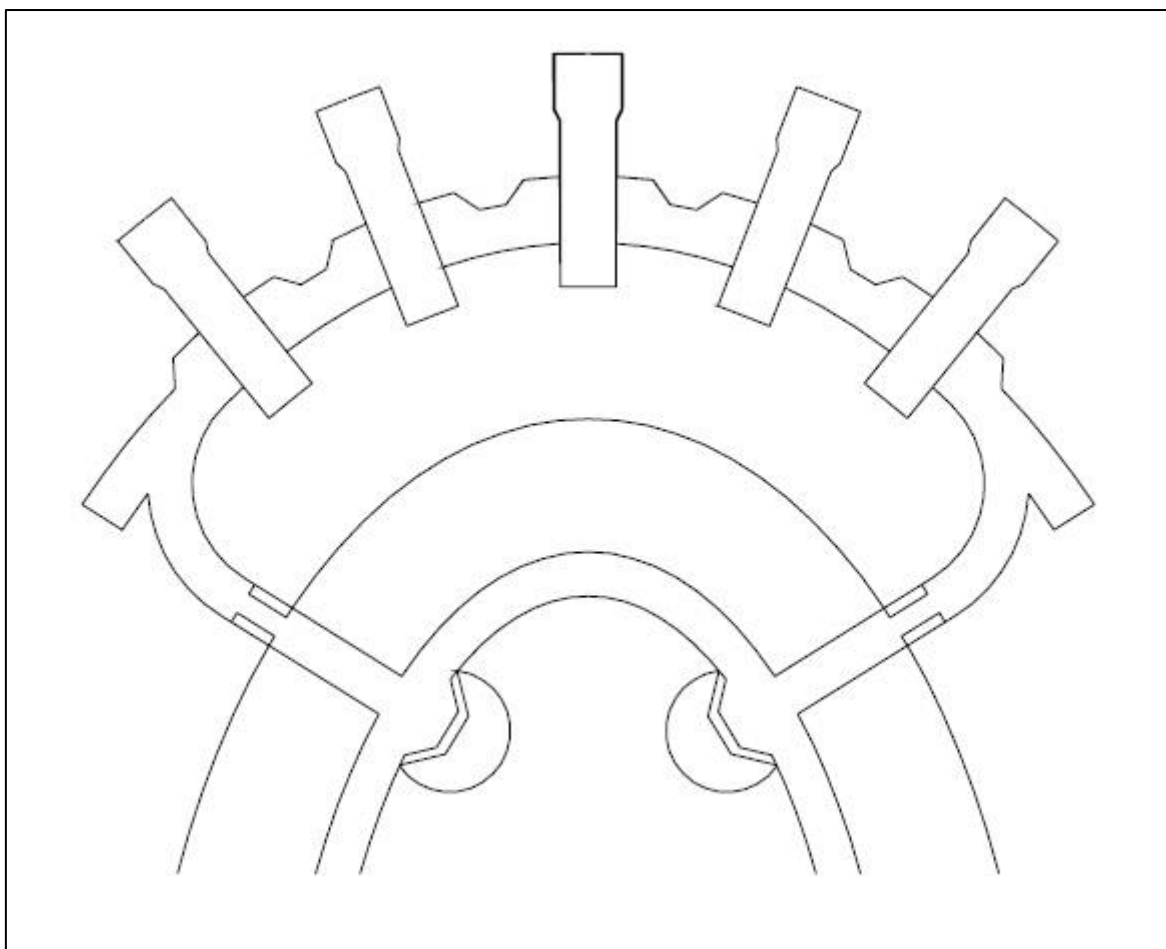
Όταν επιλέγεται η κατασκευή περισσότερων του ενός θαλάμων αποθήκευσης τότε είναι δυνατές πολλές διαμορφώσεις της εγκατάστασης και η επιλογή της κατάλληλης εξαρτάται όπως προαναφέρθηκε από διάφορους παράγοντες (γεωλογικούς, ασφαλείας κτλ). Κάθε θάλαμος έχει (συνήθως) μία σήραγγα εισόδου, οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους μέσω μίας κεντρικής σήραγγας κίνησης. Στην Εικόνα 14 φαίνεται λεπτομέρεια ενός υπόγειου χώρου αποθήκευσης πολλών θαλάμων. Η είσοδος στον χώρο γίνεται απευθείας μέσω της σήραγγας κίνησης από την οποία διακλαδώνονται οι σήραγγες εισόδου που οδηγούν στους θαλάμους αποθήκευσης. Στις Εικόνες 15 και 16 παρουσιάζονται πιθανές διαμορφώσεις ενός χώρου αποθήκευσης πολλών θαλάμων.



Εικόνα 15: Λεπτομέρεια υπόγειου χώρου αποθήκευσης πολλών θαλάμων.



Εικόνα 16: Διαμόρφωση υπόγειου χώρου αποθήκευσης πυρομαχικών πολλών θαλάμων.



Εικόνα 17: Διαμόρφωση υπόγειου χώρου αποθήκευσης πυρομαχικών πολλών θαλάμων.

4.2. Αρχές Σχεδιασμού Υπόγειου Χώρου Αποθήκευσης Πυρομαχικών

Ο σχεδιασμός νέων υπόγειων εγκαταστάσεων αποθήκευσης πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις επί τόπου συνθήκες, τις απαιτήσεις αποθήκευσης και τις λειτουργικές ανάγκες. Ωστόσο για να επιτευχθεί ο βέλτιστος συμβιβασμός μεταξύ των αντιφατικών μερικές φορές απαιτήσεων σχεδιασμού, λαμβάνεται ως προτεραιότητα καταρχήν η ασφάλεια και μετά οι επιχειρησιακές απαιτήσεις και το κόστος.

Το βάθος κατασκευής ενός υπόγειου χώρου αποθήκευσης πυρομαχικών, ήτοι το ύψος των υπερκείμενων του βραχώδους σχηματισμού, πρέπει να επιλέγεται έτσι ώστε σε περίπτωση ατυχήματος (έκρηξης) ο κίνδυνος δημιουργίας κρατήρα στην επιφάνεια πρακτικά να μηδενίζεται. Τότε οι μόνοι σημαντικοί κίνδυνοι για τον περιβάλλοντα υπέργειο χώρο είναι οι δονήσεις του εδάφους και τα προϊόντα της έκρηξης που βρίσκουν διαφυγή από την σήραγγα εισόδου.

Η επίδραση των προϊόντων της έκρηξης που διαφεύγουν μπορεί να μειωθεί σημαντικά ακόμα και να μηδενιστεί με την κατασκευή δομικών έργων εντός της σήραγγας ή στην έξοδο αυτής ή με την εγκατάσταση ειδικών μηχανισμών κλεισίματος, οι οποίοι θα περιγραφούν παρακάτω.

Κατά τον σχεδιασμό πρέπει επίσης να υπολογίζεται επαρκής απόσταση μεταξύ των θαλάμων αποθήκευσης ώστε σε περίπτωση ατυχήματος σε ένα θάλαμο να μειώνεται η επίδραση στους υπόλοιπους. Παράλληλα πρέπει να εξετάζεται η εγκατάσταση μηχανισμών κλεισίματος και στις σήραγγες εισόδου των θαλάμων ώστε να αποφεύγεται η μετάδοση της έκρηξης από τον ένα θάλαμο στον άλλο.

4.3. Επίδραση Έκρηξης Εντός Υπόγειου Χώρου

Στις εγκαταστάσεις αποθήκευσης πυρομαχικών οι διαδικασίες συσκευασίας, μεταφοράς, συγκέντρωσης, φύλαξης πρέπει να σχεδιάζονται κατά τρόπο ώστε να αποφεύγονται τα ατυχήματα. Ωστόσο το ενδεχόμενο έκρηξης των πυρομαχικών δεν μπορεί να αποκλειστεί και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη.

Ιδιαίτερα στην περίπτωση των υπόγειων αποθηκευτικών χώρων είναι το σημαντικότερο κριτήριο σχεδιασμού.

Ο ισχυρός χωρικός περιορισμός προκαλεί διαφορετικές επιδράσεις της έκρηξης στην υπόγεια κατασκευή σε σχέση με αντίστοιχη έκρηξη σε συμβατική κατασκευή. Το ωστικό κύμα που παράγεται μεταφέρεται διαμέσου του βραχώδους σχηματισμού με τη μορφή δονήσεων και διαφεύγει με την εκτόνωση των αερίων μέσω της σήραγγας εισόδου στον περιβάλλοντα χώρο.

Ο περιορισμός της έκρηξης εντός του υπόγειου χώρου και η μεγάλη ποσότητα των παραγόμενων καυσαερίων δημιουργούν μία σχετικά σταθερή υψηλή πίεση εντός του θαλάμου. Αυτή η πίεση προκαλεί ρωγμές στο περιβάλλον βραχώδη σχηματισμό και ενδεχομένως να δημιουργήσει κρατήρα στην επιφάνεια. Η κινητική ενέργεια (ώθηση δυναμικής πίεσης) της έκρηξης στην σήραγγα είναι πολύ υψηλότερη σε σχέση με μία έκρηξη σε εξωτερικό χώρο. Αντικείμενα όπως πυρομαχικά που δεν έχουν εκραγεί ή τμήματα αυτών, βράχοι, χαλίκια, εξοπλισμός και οχήματα παρασύρονται από το ωστικό κύμα και επιταχύνονται με ταχύτητες ταχύτητες αρκετών εκατοντάδων μέτρων ανά δευτερόλεπτο πριν εκτοξευτούν από την έξοδο του υπόγειου χώρου.

Μια έκρηξη (διαταραχή) στην επιφάνεια του εδάφους εκπέμπει σεισμικά κύματα χώρου, επιμήκη P και εγκάρσια S, καθώς και επιφανειακά Reyleigh και Love. Αντίστοιχες διαταραχές που δημιουργούνται σε μεγάλα βάθη εκπέμπουν μόνο κύματα P και S, τα οποία φθάνοντας στην επιφάνεια μετασχηματίζονται σε επιφανειακά. Τα P και S κύματα προκαλούν μικρές δονήσεις καθώς ακολουθούνται από μία μεγαλύτερη ταλάντωση όταν φθάνουν τα R κύματα. Τα R κύματα προκαλούν την κύρια δόνηση διότι α) περίπου τα 2/3 της ενέργειας της εδαφικής διαταραχής πηγαίνουν σε αυτά και β) διαχέονται πολύ πιο αργά με την απόσταση - r - από τα κύματα P και S ($r^{-0.5}$ σε σχέση με r^{-2}). Συνεπώς η μεγαλύτερη ενέργεια που μεταδίδουν τα κύματα R και η πιο αργή γεωμετρική διάχυση αυτής της ενέργειας, τα καθιστούν την σημαντικότερη διαταραχή για τον υπολογισμό των δονήσεων του εδάφους σε περίπτωση έκρηξης στον υπόγειο χώρο.

4.4. Τρόποι Περιορισμού των Κινδύνων της Έκρηξης

4.4.1. Σχεδιασμός Εγκατάστασης

Για τον περιορισμό των αποτελεσμάτων ενδεχόμενης έκρηξης πρέπει κατά τον σχεδιασμό να ληφθούν υπόψη τα κάτωθι:

α) Μία εγκατάσταση ενός θαλάμου με μια ευθεία σήραγγα πρόσβασης που οδηγεί από το θάλαμο στην έξοδο θεωρείται ως ένα "όπλο" έτοιμο προς πυροδότησης, καθώς σε ενδεχόμενη έκρηξη τα αέρια και τα θραύσματα συμπεριφέρονται σαν να εκτοξεύονται από ένα όπλο. Πιο πολύπλοκος σχεδιασμός των εγκαταστάσεων παρέχει μείωση της πίεσης στην έξοδο.

β) Όσο ο όγκος της εγκατάστασης αυξάνεται και συγκεκριμένα ο όγκος του θαλάμου αποθήκευσης, τόσο μειώνονται η πίεση και η δυναμική πίεση εντός του θαλάμου.

γ) Η διανομή των πυρομαχικών σε πολλούς θαλάμους μπορεί να περιορίσει το μέγεθος της έκρηξης.

δ) Κατάλληλος διαχωρισμός μεταξύ των θαλάμων ή ειδικές κατασκευές μείωσης του κινδύνου μπορούν να περιορίσουν τις επακόλουθες βλάβες μιας έκρηξης.

4.4.2. Έξοδοι

Οι έξοδοι μίας υπόγειας αποθήκης πυρομαχικών δεν πρέπει να καταλήγουν σε τέτοια σημεία όπου το ωστικό κύμα και τα εκτοξευόμενα θραύσματα μπορεί να προκαλέσουν ζημίες, όπως απέναντι από άλλες εξόδους, κτίρια, οδούς κυκλοφορίας κ.α. Επίσης, θάλαμοι που συνδέονται μεταξύ τους πρέπει να έχουν δύο εξόδους, δηλαδή η σήραγγα σύνδεσης των θαλάμων να μην είναι η μοναδική έξοδος.

4.4.3. Διακλαδώσεις Κύριας Σήραγγας

Όταν η κύρια δίοδος (σήραγγα) έχει μία έξοδο τότε οι σήραγγες εισόδου στους θαλάμους πρέπει να διακλαδίζονται σε τέτοια γωνία ώστε τα καυσαέρια της

έκρηξης να οδηγούνται προς αυτήν την έξοδο. Γωνίες μεταξύ 45 και 90 μοιρών είναι συνήθως κατάλληλες.

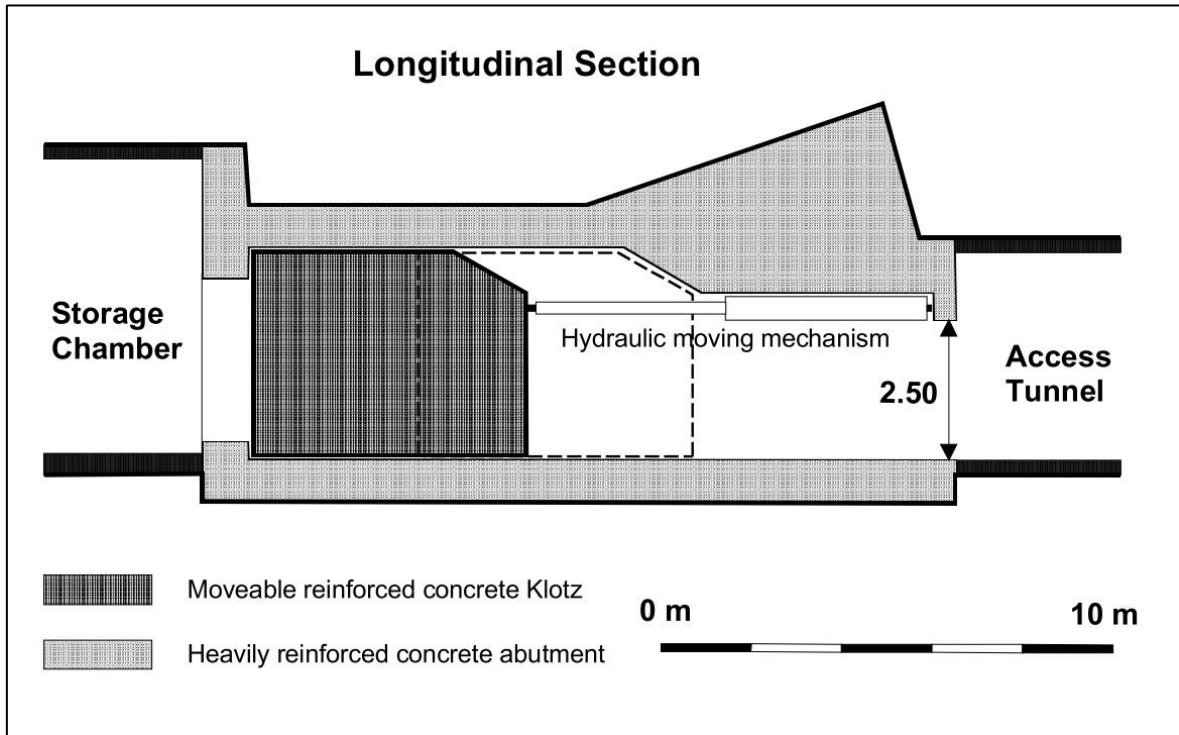
Η απόσταση μεταξύ του θαλάμου και της κύριας διόδου πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση ή μεγαλύτερη από την απόσταση μεταξύ των θαλάμων. Σε αντίθετη περίπτωση, οι δονήσεις από την έκρηξη σε ένα θάλαμο μπορεί να καταστρέψουν την κύρια δίοδο και να εμποδίζουν την πρόσβαση σε αποθέματα πυρομαχικών και εκρηκτικών στους άλλους θαλάμους.

4.4.4. Μηχανισμοί Κλεισίματος

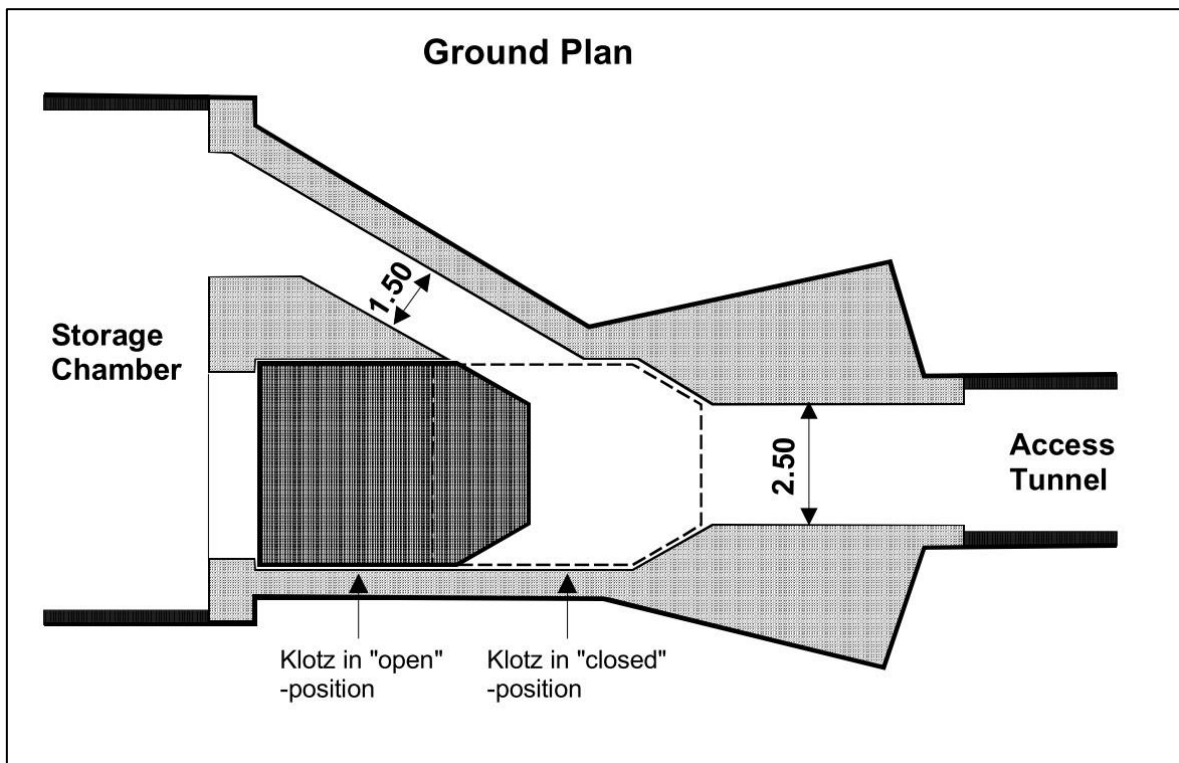
Οι μηχανισμοί κλεισίματος υψηλής πίεσης είναι μεγάλα τμήματα (μπλοκ) που κατασκευάζονται από σκυρόδεμα ή άλλα υλικά και μπορούν να εμποδίσουν ή να μειώσουν σημαντικά τη ροή των αερίων της έκρηξης και των θραυσμάτων από ή προς ένα θάλαμο αποθήκευσης. Για θαλάμους με πυκνότητα αποθήκευσης από 10 kg/m^3 και άνω, οι μηχανισμοί κλεισίματος μπορούν να περιορίσουν πάνω από το 40% των συντριμμίων της έκρηξης εντός του θαλάμου εκτονώσεως, με την προϋπόθεση ότι ο μηχανισμός έχει σχεδιαστεί για να μην θρυμματίζεται. Αν ένα μπλοκ κλεισίματος ρωγματωθεί και καταρρεύσει θα παράγει θραύσματα επιπλέον σε αυτά που υπήρχαν στον θάλαμο από την έκρηξη. Ωστόσο, επειδή η μάζα του μπλοκ και η αδράνεια είναι επαρκή για να μειώσει σημαντικά την ταχύτητα των πρωτογενών θραυσμάτων, η αποτελεσματικότητα άλλων μηχανισμών περιορισμού αυξάνεται (παγίδες θραυσμάτων και θάλαμοι αποτόνωσης που περιγράφονται παρακάτω).

Μία άλλη δοκιμή πλήρους κλίμακας που έχει πραγματοποιηθεί από το Swiss Federal Buildings Office/Engineering Division είναι το **Swiss-Klotz** που φαίνεται στις Εικόνες 18 και 19. Η διάταξη αυτή είναι πολύ αποτελεσματική για θαλάμους με πυκνότητα αποθήκευσης έως 28 kg/m^3 . Ένα επιπλέον πλεονέκτημα του Swiss-Klotz είναι ότι είναι κινητή διάταξη και μπορεί να αποκλείσει την πρόσβαση στον θάλαμο όταν αυτή δεν είναι απαραίτητη, προσφέροντας έτσι επιπλέον ασφάλεια. Στην περίπτωση έκρηξης εντός του θαλάμου αποθήκευσης ενώ η διάταξη είναι στην κλειστή θέση, πρακτικά όλα τα επικίνδυνα θραύσματα και τα αέρια της έκρηξης παγιδεύονται εντός του θαλάμου και η επίδραση τους στην υπόλοιπη κατασκευή ουσιαστικά μηδενίζεται. Στην περίπτωση που η

διάταξη είναι στην ανοιχτή θέση, θα σπρωχτεί στην κλειστή θέση από το αέριο ωστικό κύμα της έκρηξης εντός περίπου 100ms, αφήνοντας δίοδο σε ένα μικρό μέρος του συνόλου των θραυσμάτων και αερίων.



Εικόνα 18: Κάθετη τομή της διάταξης Swiss-Klotz.



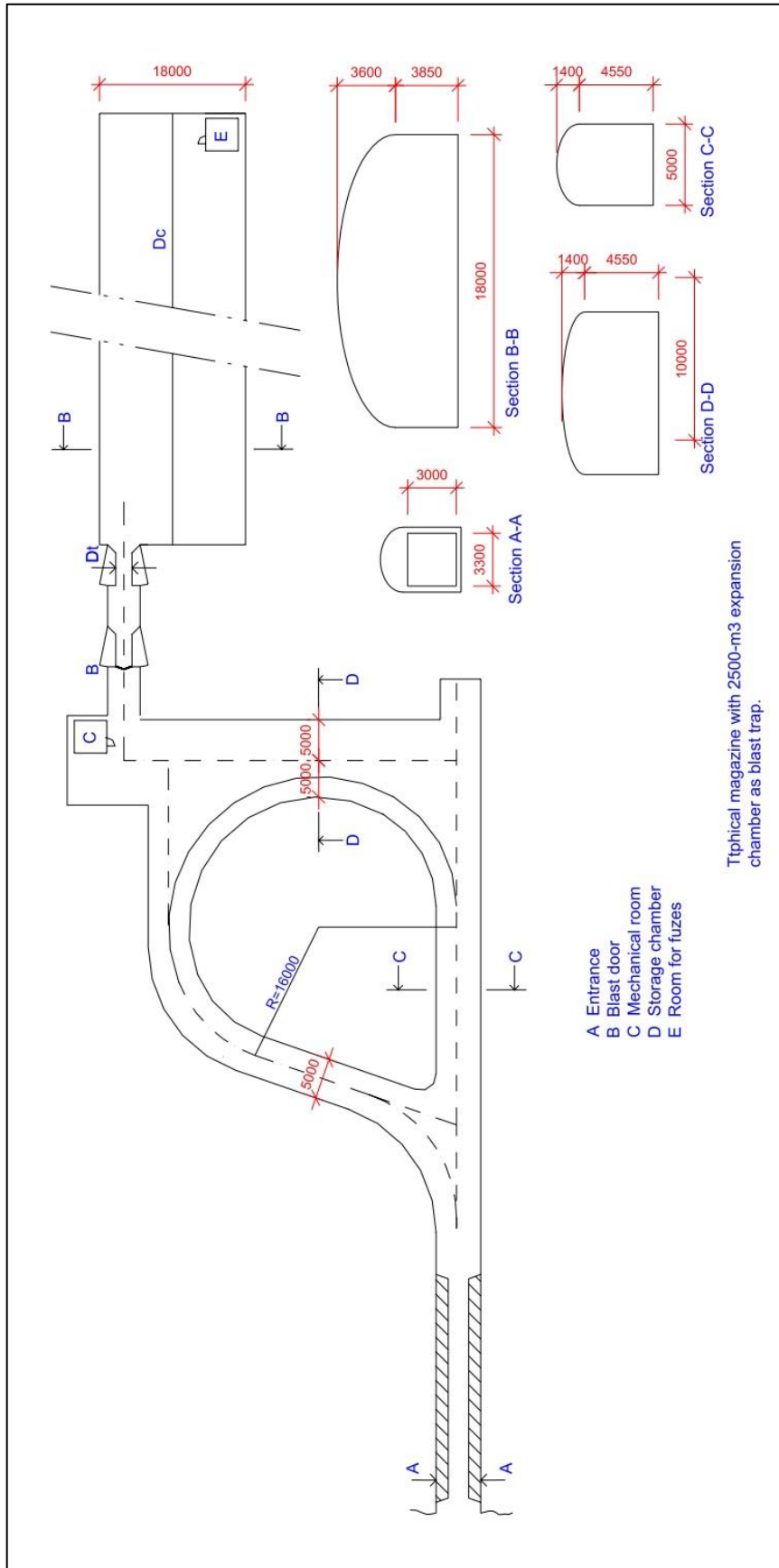
Εικόνα 19: Κάτοψη της διάταξης Swiss-Klotz.

Σε κάθε περίπτωση χρησιμοποιώντας ένα κατάλληλα σχεδιασμένο μηχανισμό κλεισίματος, σε συνδυασμό με άλλες διατάξεις περιορισμού των θραυσμάτων, ο κίνδυνος από τα θραύσματα περιορίζεται σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Η εκτίμηση του Ο κίνδυνος

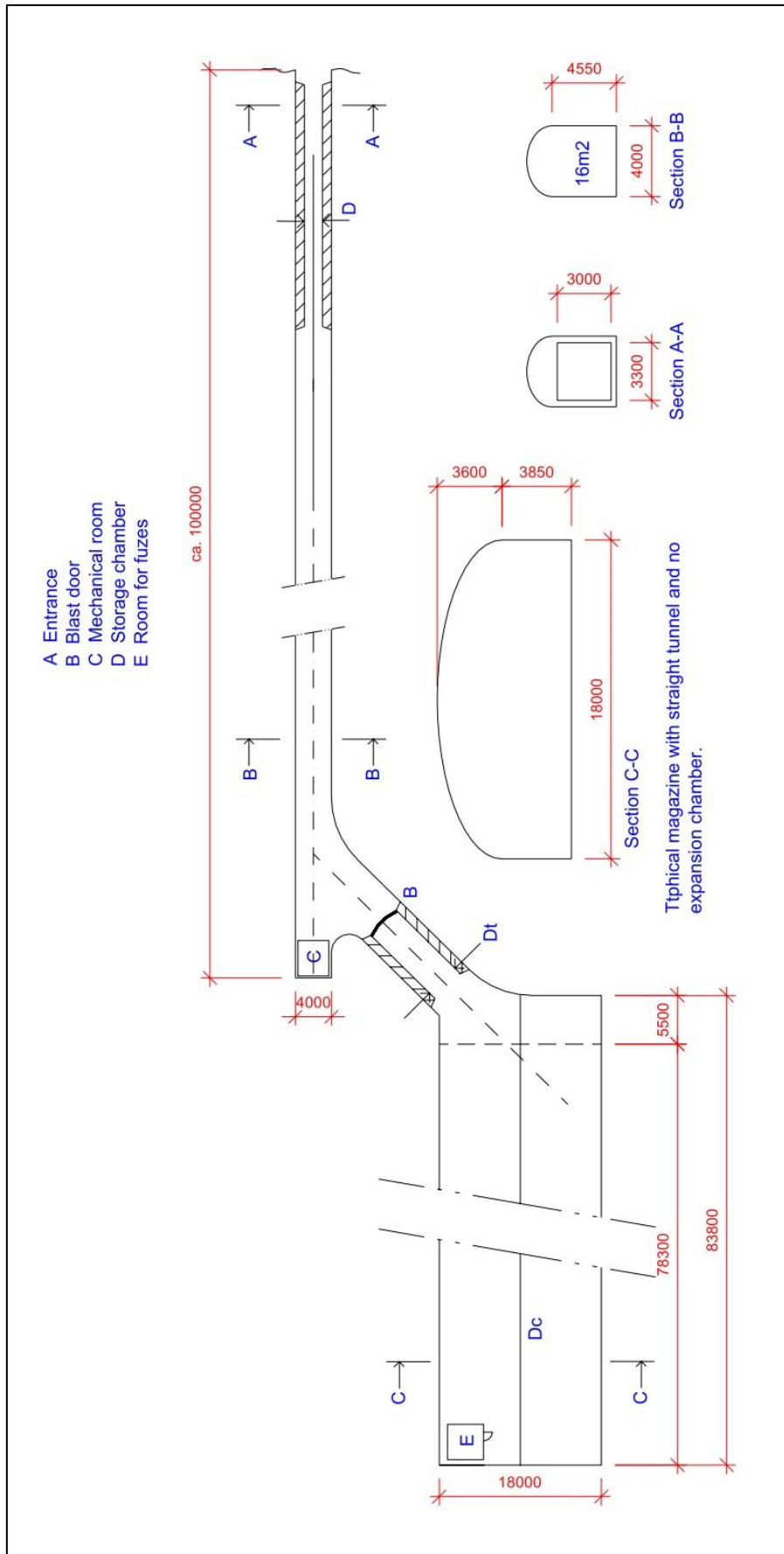
Για θαλάμους με πυκνότητα αποθήκευσης μικρότερη των 10 kg/m^3 για τον περιορισμό των θραυσμάτων έκρηξης μπορούν να χρησιμοποιηθούν αντιαεκρηκτικές θύρες.

4.4.5. Θάλαμοι Αποτόνωσης

Οι θάλαμοι αποτόνωσης είναι χώροι που κατασκευάζονται για την αποτόνωση των αερίων της έκρηξης πίσω από το μέτωπο της έκρηξης καθώς εισέρχεται στο θάλαμο από την σήραγγα εισόδου. Επίσης, καθώς τα αέρια της έκρηξης εκτονώνονται στον θάλαμο και ανακλώνται στους τοίχους του, επέρχεται μείωση της πίεσης στο μέτωπο του αέριου κύματος καθώς μέρος της ενέργειας του χάνεται. Οι θάλαμοι αποτόνωσης έχουν και άλλη χρησιμότητα καθώς μπορούν λειτουργήσουν ως χώροι φόρτωσης αλλά και για την αναστροφή των μεταφορικών μέσων. Στην Εικόνα 20 φαίνεται διάταξη αποτόνωσης πριν την είσοδο του θαλάμου αποθήκευσης, ενώ στην Εικόνα 21 φαίνεται θάλαμος χωρίς αποτόνωσης.



Εικόνα 20: Θάλαμος αποθήκευσης με διάταξη αποτόνωσης.

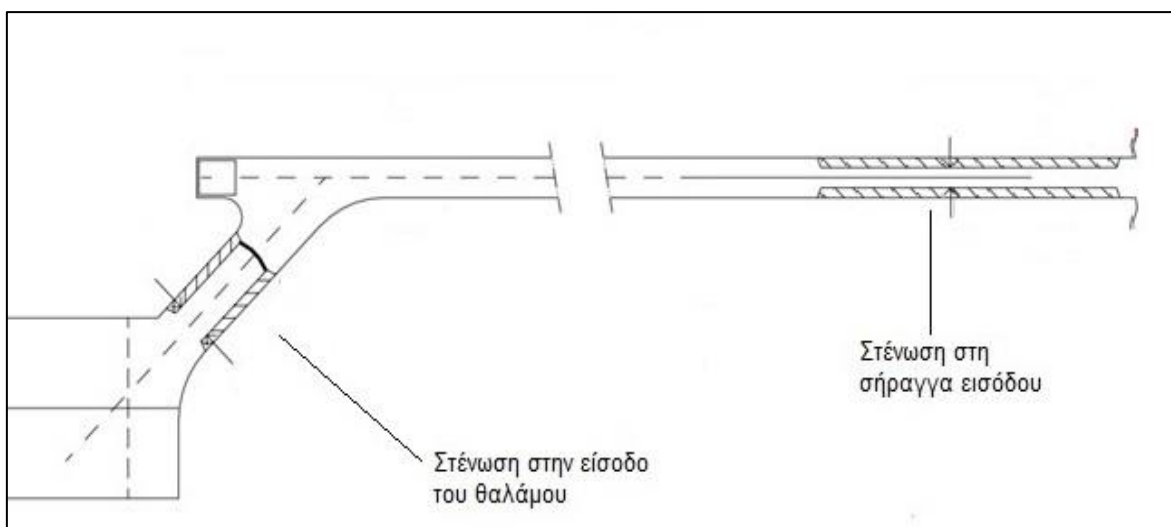


Εικόνα 21: Θάλαμος αποθήκευσης χωρίς διάταξη αποτόνωσης.

4.4.6. Στενώσεις

Για τον περιορισμό των κινδύνων της έκρηξης δημιουργούνται στενώσεις δηλαδή μειώσεις της διατομής της σήραγγας εισόδου στο θάλαμο για ένα συγκεκριμένο (μικρό) μήκος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 22. Η κατασκευή στένωσης στην είσοδο του θαλάμου θα οδηγήσει σε μείωση του όγκου των αερίων και της θερμότητας της έκρηξης. Επίσης, η στένωση μειώνει την επιφάνεια, και ως εκ τούτου το μέγεθος, της απαιτούμενης αντιακρηκτικής θύρας, που ενδεχομένως χρησιμοποιείται για την προστασία του θαλάμου.

Η στένωση πρέπει να απέχει από την είσοδο του θαλάμου απόσταση μικρότερη από πέντε φορές τη διάμετρο της σήραγγας εισόδου. Στενώσεις που κατασκευάζονται σε απόσταση μεγαλύτερη από πέντε φορές τη διάμετρο μειώνουν την πίεση των αερίων της έκρηξης (με την καθυστέρηση της απελευθέρωσης της ενέργειάς τους) αλλά πρέπει να εξεταστεί η επίδρασή τους στη συγκεκριμένη κατασκευή.



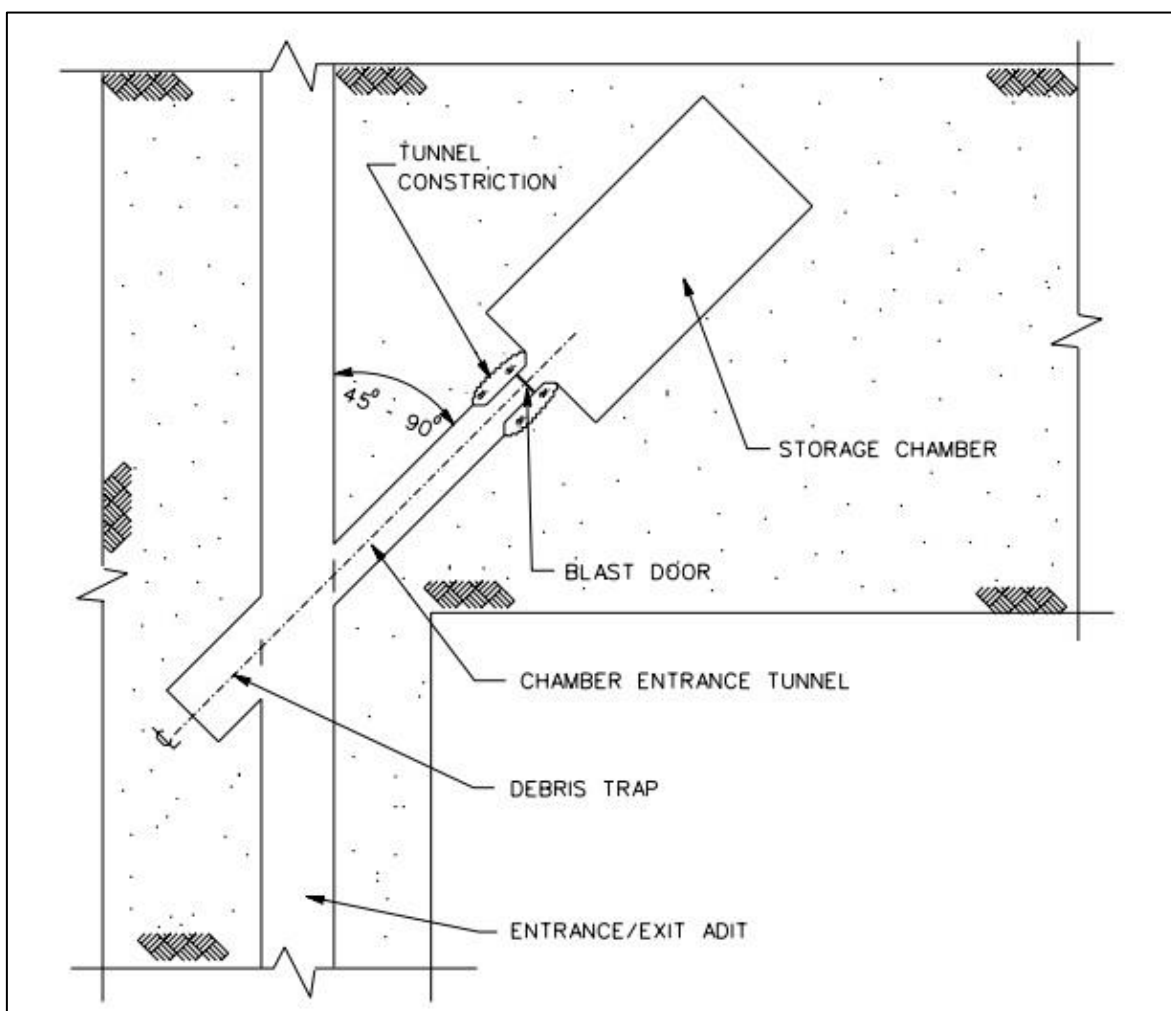
Εικόνα 22: Στενώσεις

4.4.7. Παγίδες Θραυσμάτων

Η παγίδα θραυσμάτων είναι ουσιαστικά μία επέκταση της σήραγγας εισόδου στο θάλαμο πέρα από τη διασταύρωσή της με την κύρια σήραγγα, με

σκοπό την συγκέντρωση θραυσμάτων από την έκρηξη. Στην περίπτωση έκρηξης σε ένα θάλαμο αποθήκευσης τα αέρια της έκρηξης και τα θραύσματα θα ακολουθήσουν την σήραγγα εισόδου και στην συνέχεια μέσω της κύριας σήραγγας θα εκτοξευτούν στον εξωτερικό χώρο. Η επέκταση της σήραγγας οδηγεί μεγάλο μέρος των θραυσμάτων στο χώρο αυτό όπου χτυπούν στον τοίχο και σταματάει η πορεία τους σε εκείνο το σημείο.

Οι παγίδες θραυσμάτων πρέπει να είναι τουλάχιστον 20% μεγαλύτερου πλάτους και 10% μεγαλύτερου ύψους από την σήραγγα εισόδου του θαλάμου για τον οποίο κατασκευάζονται. Το μήκος τους πρέπει να είναι τουλάχιστον μία διάμετρο της σήραγγας.



Εικόνα 22: Παγίδα θραυσμάτων (Debristrap)

4.4.8. Παγίδες Έκρηξης

Για την μείωση της έντασης της έκρηξης που εισέρχεται ή εξέρχεται μίας σήραγγας χρησιμοποιούνται κατάλληλες διατάξεις (παγίδες). Οι διατάξεις αυτές χρησιμοποιούνται για την εξασθένηση του αερικού ωστικού κύματος της έκρηξης που εξέρχεται από την είσοδο της υπόγειας εγκατάστασης, ώστε να περιοριστούν οι επιπτώσεις σε προσωπικό, μέσα και κατασκευές που βρίσκονται στον εξωτερικό χώρο. Μπορεί επίσης να κατασκευαστεί για τον περιορισμό της έντασης της έκρηξης ώστε να αποφευχθεί η εξάπλωση της από τον ένα θάλαμο στον άλλο.

Η αποτελεσματικότητα των παγίδων είναι συνάρτηση της γεωμετρίας της διάταξης και των χαρακτηριστικών της έκρηξης. Για το λόγο αυτό δεν υφίστανται συγκεκριμένοι συντελεστές μείωσης για κάθε διάταξη. Ο σχεδιασμός των παγίδων πρέπει να γίνεται με βάση τα ιδιαίτερα στοιχεία κάθε αποθηκευτικού χώρου. Ωστόσο ένας γενικός κανόνας είναι ότι για τη μέγιστη απομείωση της έντασης της έκρηξης είναι ότι το μήκος των παγίδων πρέπει να είναι τουλάχιστον το μισό του μήκους του ωστικού κύματος της έκρηξης. Αυτό μπορεί βέβαια να οδηγήσει σε υπερβολικό μεγάλο μήκος των παγίδων στην περίπτωση μεγάλων ποσοτήτων πυρομαχικών – εκρηκτικών.

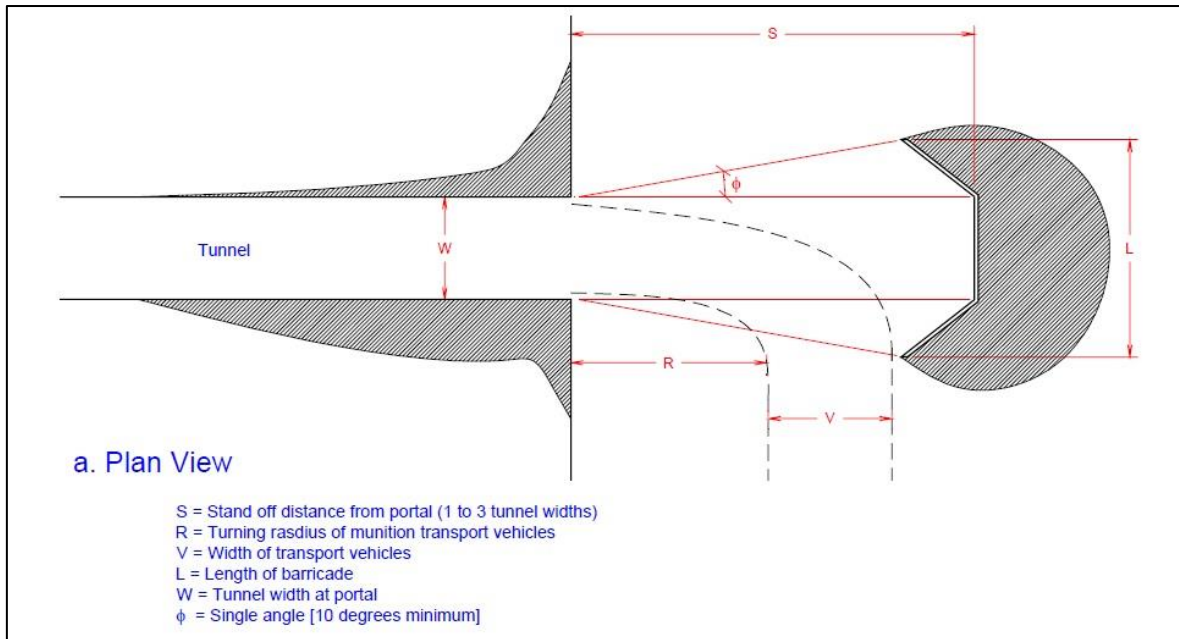
Διάφοροι τύποι παγίδων δίνονται στην Εικόνα 23. Η σχετική απομείωση της πίεσης της έκρηξης και συνεπώς η αποτελεσματικότητα των διατάξεων αυτών εξαρτάται επίσης και από το σημείο που τοποθετούνται. Στροφές, διασταυρώσεις, εμπόδια και αλλαγές διατομής μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μείωση της μέγιστης υπερπίεσης και της θετικής ώθησης από την έκρηξη. Τα διαγράμματα στην παρακάτω εικόνα απεικονίζουν μερικές από τις πολλές πιθανές διατάξεις. Η έκρηξη k υποτίθεται ότι κινείται από το σημείο που υποδεικνύεται από ένα σταυρό σε αυτό που φαίνεται με μια τελεία. Κρίσιμες διαστάσεις υποδεικνύονται ως πολλαπλάσια της διαμέτρου "b". Μερικές διατάξεις έχουν μικρή επίδραση καθώς μειώνουν την ένταση της έκρηξης μόνο κατά 10% (σε σχέση με την ελεύθερη ευθεία διέλευση) ενώ με άλλες η μείωση φτάνει το 80%. Επομένως, είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί το πραγματικό αποτέλεσμα του επιλεγμένου σχεδίου με μετρήσεις σε ένα μοντέλο κατάλληλης κλίμακας και σε σχέση με τα προς αποθήκευση εκρηκτικά.

Ref.No	LAYOUT	Ref.No	LAYOUT	Ref.No	LAYOUT	Ref.No	LAYOUT	Ref.No	LAYOUT	Ref.No	LAYOUT		
1		6		11		16		21		26		30	
2		7		12		17		22		27		31	
3		8		13		18		23		28			
4		9		14		19		24		29			
5		10		15		20		25					

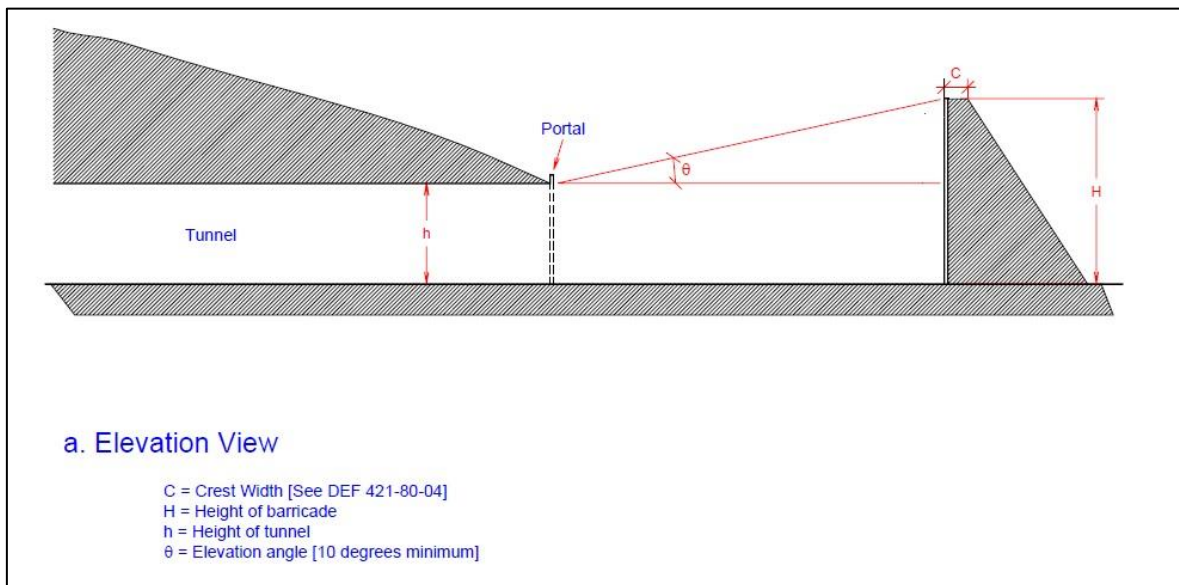
Εικόνα 23: Παγίδες έκρηξης

4.4.9. Οδόφραγμα Εξόδου

Όπως προαναφέρθηκε η έκρηξη σε ένα θάλαμο του υπόγειου αποθηκευτικού χώρου θα δημιουργήσει ένα αέριο ωστικό κύμα το οποίο θα βρει διέξοδο από την είσοδο της εγκατάστασης. Θα έχουμε μία βίαιη έξοδο μεγάλων ποσοτήτων αερίων και θραυσμάτων κατά μήκος της επέκτασης του κεντρικός άξονα της διατομής της κυρίως σήραγγας του υπόγειου χώρου. Το ωστικό κύμα που εξέρχεται του υπόγειου χώρου εξασθενεί πιο αργά από το ωστικό κύμα επιφανειακής έκρηξης και γιαυτό μπορεί να προκαλέσει βλάβες σε μεγαλύτερη απόσταση. Ωστόσο η τοποθέτηση ενός οδοφράγματος μπροστά στην έξοδο του υπόγειου χώρου αναχαιτίζει το ωστικό κύμα και το οδηγεί σε διαφορετική κατεύθυνση (από την επέκταση του άξονα της σήραγγας). Αυτή η αλλαγή κατεύθυνσης προκαλεί την εξασθένηση των ωστικών κυμάτων.



Εικόνα 24: Κάτοψη οδοφράγματος εξόδου



Εικόνα 25: Τομή οδοφράγματος εξόδου

4.5. Αποστάσεις Ασφαλείας (Quantity-Distances)

4.5.1. Γενικά

Στην περίπτωση των επίγειων αποθηκευτικών χώρων πυρομαχικών οι πιθανές θέσεις έκρηξης όπως κτίρια, σωροί απόθεσης, οχήματα μεταφοράς κ.α. αποτελούν πηγή κινδύνου για το προσωπικό και τα μέσα που βρίσκονταν κοντά σε αυτά. Τέτοιες περιοχές βρίσκονται σε προσεκτικά υπολογιζόμενες αποστάσεις μεταξύ τους και από κάθε άλλο κτίριο και εγκατάσταση για να εξασφαλιστεί ο ελάχιστος δυνατός κίνδυνος για τους ανθρώπους και τα μέσα. Οι αποστάσεις αυτές ονομάζονται Quantity – Distances (QD) (Ποσοτικές Αποστάσεις) γιατί εξαρτώνται άμεσα από την ποσότητα της εκρηκτικής ύλης που εκρήγνυται.

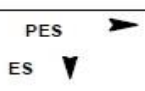


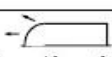

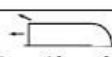




Τιμές για της QD μπορούν να βρεθούν από αντίστοιχους πίνακες. Ο υπολογισμός τους βασίζεται σε μια εκτενή σειρά δοκιμών και σε προσεκτική ανάλυση όλων των διαθέσιμων στοιχείων σχετικά με τις ακούσιες εκρήξεις σε όλον τον κόσμο. Παρόλο που οι QD υπόκεινται στην αβεβαιότητα λόγω της μεταβλητότητας των εκρήξεων, οι τιμές αυτές δίνονται για να καθορίσουν τα όρια, δηλαδή ελάχιστες ή μέγιστες αποστάσεις, και είναι ανεξάρτητες από το καθαρό βάρος των εκρηκτικών που αστοχούν. Στην Εικόνα 26 παρουσιάζεται ενδεικτικός πίνακας QD για επίγειες εγκαταστάσεις.

Όσον αφορά τους υπόγειους χώρους αποθήκευσης πυρομαχικών ο υπολογισμός της QD γίνεται λαμβάνοντας υπόψη τους κάτωθι κινδύνους:

- α) Εδαφικές Δονήσεις
- β) Εκτοξευόμενοι λίθοι – θραύσματα
- γ) Αέριο ωστικό κύμα

Αφού υπολογιστούν οι απαιτούμενες αποστάσεις από την επίδραση κάθε κινδύνου λαμβάνεται ως αποδεκτή η μεγαλύτερη. Οι αποστάσεις που υπολογίζονται βάση των δονήσεων της έκρηξης είναι ίδιες σε όλες τις κατευθύνσεις θεωρώντας ένα ομογενές γεωλογικό μέσο. Αντίθετα οι αποστάσεις που υπολογίζονται με βάση τα θραύσματα και τα αέρια διαφέρουν σημαντικά ανάλογα με την διεύθυνση.

Τα χαρακτηριστικά αυτών των αποτελεσμάτων της έκρηξης (δονήσεις, θραύσματα, ωστικό κύμα) εξαρτώνται από πολλές μεταβλητές όπως η τοπική γεωλογία και ο σχεδιασμός του υπόγειου χώρου. Αυτές οι μεταβλητές διαφέρουν σημαντικά για κάθε εγκατάσταση. Γιαυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποστάσεις διαφορετικές από αυτές που υπολογίζονται παρακάτω, αρκεί να βασίζονται σε πειραματικά δεδομένα και αναλυτικά στοιχεία που να αποδεικνύουν ότι το επιθυμητό επίπεδο ασφάλειας μπορεί να επιτευχθεί.

 PES  ES 	 Building with earth on the roof and against three walls. Directional effects through the door and headwall are away from an Exposed Site. (a)	 Building with earth on the roof and against three walls. Directional effects through the door and headwall are perpendicular to the direction of an ES. (b)	 Building with earth on the roof and against three walls. Directional effects through the door and headwall are towards an Exposed Site (c)
 14 Building constructed with walls of 215 mm brick (or equivalent) and protective roof of 150 mm concrete with suitable support, barricaded.	D4 High degree of protection 1.3.3.5 No primary explosives 1.3.5.3 No items vulnerable to spall or D7 High degree of protection	D4 High degree of protection 1.3.3.5 No primary explosives 1.3.5.3 No items vulnerable to spall or D7 High degree of protection	D4 High degree of protection 1.3.3.5 No primary explosives 1.3.5.3 No items vulnerable to spall or D7 High degree of protection
 15 Building constructed with walls of 215 mm brick (or equivalent) and protective roof of 150 mm concrete with suitable support, unbarricaded.	D4 High degree of protection 1.3.3.5 No primary explosives 1.3.5.3 No items vulnerable to spall or D7 High degree of protection	D4 High degree of protection 1.3.3.5 No primary explosives 1.3.5.3 No items vulnerable to spall or D7 High degree of protection	D9 Limited degree of protection or D12 High degree of protection
 16 Open air stack or light structure, barricaded. Truck, trailer, rail-car or freight container loaded with ammunition, barricaded.	D4 High degree of protection 1.3.3.5 No primary explosives 1.3.5.3 No items vulnerable to spall or D7 High degree of protection	D4 High degree of protection 1.3.3.5 No primary explosives 1.3.5.3 No items vulnerable to spall or D7 High degree of protection	D4 High degree of protection 1.3.3.5 No primary explosives 1.3.5.3 No items vulnerable to spall or D7 High degree of protection
 17 Open air stack or light structure, unbarricaded. Truck, trailer, rail-car or freight container loaded with ammunition, unbarricaded.	D4 High degree of protection 1.3.3.5 No primary explosives 1.3.5.3 No items vulnerable to spall or D7 High degree of protection	D4 High degree of protection 1.3.3.5 No primary explosives 1.3.5.3 No items vulnerable to spall or D7 High degree of protection	D9 Limited degree of protection or D12 High degree of protection

Εικόνα 26: Πίνακας QD για επίγειες εγκαταστάσεις.

Επισημαίνεται ότι περιορισμοί που προκύπτουν από τις QD δεν παρέχουν απόλυτη ασφάλεια. Ωστόσο, στην περίπτωση ενός συμβάντος - ατυχήματος οι αποστάσεις αυτές περιορίζουν την πιθανότητα ενός σοβαρού τραυματισμού ή θανάτου σε ποσοστό μικρότερο του 1% για το προσωπικό που βρίσκεται σε υπαίθριο χώρο ή σε ένα συμβατικό κτίριο. Στις περιπτώσεις που κοντά στον υπόγειο χώρο υφίστανται ιστορικά μνημεία, αρχαιολογικοί τόποι, υψηλά κτίρια ή

χώροι συγκέντρωσης ατόμων πρέπει να λαμβάνονται ιδιαίτερες προφυλάξεις, που δεν εξετάζονται στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Σημειώνεται ότι η διαμόρφωση των υπόγειων εγκαταστάσεων αποθήκευσης πυρομαχικών διαφέρουν από τόπο σε τόπο ενώ μόνο ένα μικρό μέρος των πιθανών διαμορφώσεων έχει μελετηθεί. Οι οδηγίες για την διαμόρφωση τέτοιου είδους εγκαταστάσεων βασίζονται στις βέλτιστες διαθέσιμες πληροφορίες από την παγκόσμια πρακτική καθώς και σε δοκιμές σε μοντέλα χάλυβα (κλίμακας 1/100 έως 1/20) ή βραχυδών σηράγγων (κλίμακας 1/8 έως 1/3). Για τους λόγους αυτούς στις περιπτώσεις σύνθετων διαμορφώσεων, που εκφεύγουν των προτεινόμενων από την βιβλιογραφία, απαιτούνται επί τόπου δοκιμές και αναλύσεις στον συγκεκριμένο χώρο.

4.5.2. Κίνδυνοι από την Έκρηξη

1) Εντός του υπόγειου χώρου

Ο διαθέσιμος όγκος για την εκτόνωση μίας έκρηξης είναι πολύ μικρότερος σε μία υπόγεια εγκατάσταση από ότι είναι σε μια υπέργεια. Εξαιτίας αυτού του περιορισμένου χώρου, μια έκρηξη σε ένα υπόγειο χώρο έχει μεγάλη διάρκεια και παρουσιάζει υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες. Εάν δεν χρησιμοποιούνται ισχυρές μηχανικές διατάξεις (πόρτες ή / και άλλες συσκευές κλεισίματος) για το διαχωρισμό διαφόρων τμημάτων της εγκατάστασης, αυτά τα μακράς διάρκειας αποτελέσματα της έκρηξης εξαπλώνονται σε όλο το υπόγειο συγκρότημα. Για τον περιορισμό της έκρηξης πρέπει να χρησιμοποιούνται οι διατάξεις – κατασκευές που αναλύθηκαν στην ανωτέρω παρ. 4.2 και να έχουν σχεδιαστεί κατάλληλα.

2) Εκτός του υπόγειου χώρου

Μετά την έκρηξη τα θραύσματα εκτινάσσονται από την είσοδο του υπόγειου χώρου στην διεύθυνση της επέκτασης του κεντρικού άξονα της σήραγγας. Οι κατασκευές, τα μέσα και το ανθρώπινο δυναμικό που βρίσκεται εκτός του υπόγειου χώρου μπορεί να κινδυνεύσει από τα ακόλουθα:

α) Αέριο ωστικό κύμα που εκτονώνεται από την είσοδο του υπόγειου χώρου. Το ωστικό κύμα εκτονώνεται με πιο αργό ρυθμό στη διεύθυνση του άξονα από ότι στις άλλες διευθύνσεις.

β) Ωστικό κύμα από τη δημιουργία κρατήρα (αν τα υπερκείμενα δεν έχουν το απαραίτητο ύψος).

γ) Θραύσματα που εκτινάσσονται από την είσοδο του υπόγειου χώρου στην διεύθυνση της επέκτασης του κεντρικού άξονα της σήραγγας.

δ) Θραύσματα από τη δημιουργία κρατήρα.

ε) Εδαφικές δονήσεις.

στ) Φωτιά και αέρια υψηλής θερμοκρασίας (ανάλογα με την εκρηκτική ύλη).

4.5.3. Απαραίτητες Αποστάσεις Ασφαλείας QD

Για την προφύλαξη του προσωπικού και των υλικών – μέσων από τους ανωτέρω κινδύνους της έκρηξης σε ένα θάλαμο αποθήκευσης, κατά τον σχεδιασμό ενός υπόγειου χώρου αποθήκευσης πυρομαχικών υπολογίζονται οι αποστάσεις ασφαλείας QD για τα ακόλουθα:

1) Εντός του υπόγειου χώρου

α) Απόσταση μεταξύ των θαλάμων

β) Θέσεις φόρτωσης / εκφόρτωσης

γ) Αποστάσεις χώρων συντήρησης πυρομαχικών

2) Εκτός του υπόγειου χώρου

α) Απόσταση Κατοικήσιμων Κατασκευών (Inhabited Building Distance – IBD) ορίζεται ως η μικρότερη απόσταση που βρίσκονται κατοικήσιμες (μόνιμα ή προσωρινά) κατασκευές από την έξοδο του υπόγειου χώρου.

β) Απόσταση Δημόσιων Οδών Κυκλοφορίας (Public Traffic Route Distance – PTRD) ορίζεται ως η μικρότερη απόσταση που απέχει μία δημόσια οδός κυκλοφορίας από την έξοδο του υπόγειου χώρου.

γ) Απόσταση Χώρων Επεξεργασίας Εκρηκτικών / Πυρομαχικών (Explosives Workshop Distance - EWD) ορίζεται ως η μικρότερη απόσταση που απέχει ο χώρος που γίνεται η συντήρηση και επεξεργασία των πυρομαχικών από την έξοδο του υπόγειου χώρου.

δ) Απόσταση Επιχωματωμένων Υπέργειων Αποθηκών Πυρομαχικών (Earth-covered Magazine Distance – ECMD) ορίζεται ως η μικρότερη απόσταση που απέχουν υπέργειες αποθήκες από την έξοδο του υπόγειου χώρου.

ε) Απόσταση Υπόγειων Αποθηκών Πυρομαχικών (Earth-covered Magazine Distance – ECMD) ορίζεται ως η απόσταση που απέχει η έξοδος άλλης υπόγειας αποθήκης πυρομαχικών από την έξοδο του υπόγειου χώρου.

Οι ανωτέρω αποστάσεις που υπολογίζονται εκτός του υπόγειου χώρου είναι συνήθως ακτινικές αποστάσεις.

Επισημαίνεται ότι με το αέριο ωστικό κύμα και τα θραύσματα διαφεύγουν από κάθε «έξοδο» του υπόγειου χώρου, ήτοι από τη σήραγγα εισόδου / εξόδου, τα φρεάτια εξαερισμού κτλ. Συνεπώς πρέπει να λαμβάνονται αποστάσεις ασφαλείας από όλα αυτά τα σημεία.

Αποστάσεις που υπολογίζονται βάση του αέριου ωστικού κύματος και των θραυσμάτων μετρούνται από την «έξοδο» της σήραγγας έως το κοντινότερο σημείο της κατασκευής ή περιοχής. Στην περίπτωση δημιουργίας κρατήρα στην επιφάνεια οι αντίστοιχες αποστάσεις μετρούνται από το κέντρο του κρατήρα.

Αποστάσεις που υπολογίζονται βάση των δονήσεων μετρούνται από τον θάλαμο αποθήκευσης που έγινε η έκρηξη έως το κοντινότερο σημείο της κατασκευής ή περιοχής.

4.5.4. Κατηγορίες Κινδύνου Πυρομαχικών - Εκρηκτικών

Για τον υπολογισμό των αποστάσεων ασφαλείας τα στρατιωτικής χρήσης πυρομαχικά και εκρηκτικά χωρίζονται σε έξι κατηγορίες (hazard divisions HD) ανάλογα με το επίπεδο του κινδύνου που αναμένεται σε περίπτωση ατυχήματος [14].

Hazard Divisions 1.1	Μαζική έκρηξη
Hazard Divisions 1.2	Κίνδυνος εκτόξευσης αλλά όχι μαζικής έκρηξης
Hazard Divisions 1.3	Φωτιά και εκπεμπόμενη θερμότητα
Hazard Divisions 1.4	Μη σημαντικός κίνδυνος

Hazard Divisions 1.5	Εκρηκτικές ύλες με πολύ μικρή ευαισθησία αλλά με κίνδυνο πιθανότητα μαζικής έκρηξης
Hazard Divisions 1.6	Εκρηκτικές ύλες με πολύ μικρή ευαισθησία αλλά χωρίς κίνδυνο μαζικής έκρηξης

Για τους υπολογισμούς των αποστάσεων ασφαλείας στην παρούσα διπλωματική εργασία έχει ληφθεί μόνο η κατηγορία HD 1.1, η οποία είναι και η δυσμενέστερη.

4.5.5. Απόσταση Μεταξύ των Θαλάμων

Η έκρηξη σε ένα θάλαμο αποθήκευσης μπορεί να επηρεάσει τους γειτονικούς θαλάμους μέσω:

α) Της αποκόλλησης τεμαχίων από τις παρειές του γειτονικού θαλάμου (spalling).

β) Της μεταφοράς του αέριου ωστικού κύματος και της θερμότητας μέσω συνδετήριων σηράγγων / ανοιγμάτων (αν υπάρχουν).

γ) Της διάδοσης της έκρηξης μέσω των ρωγμών του πετρώματος.

Κατά τον σχεδιασμό υπολογίζεται η απαιτούμενη απόσταση μεταξύ των θαλάμων D_{cd} για κάθε μία από τις ανωτέρω περιπτώσεις, και λαμβάνεται ως αποδεκτή η μεγαλύτερη. Η ελάχιστη αποδεκτή τιμή της D_{cd} είναι 5m.

α) Όταν γίνεται μία έκρηξη σε ένα θάλαμο, το κρουστικό κύμα διαδίδεται από το περιβάλλον πέτρωμα. Η ένταση του κύματος μειώνεται με την απόσταση διάδοσης. Για μικρές αποστάσεις διαχωρισμού θαλάμων, το κύμα μπορεί να έχει αρκετή ένταση ώστε να προκαλέσει αποκόλληση του βραχώδους σχηματισμού στις παριές του γειτονικού θαλάμου.

Για σκληρό πέτρωμα χωρίς διατάξεις προστασίας ενάντια στις αποκολλήσεις για τον υπολογισμό το D_{cd} ισχύει ο τύπος:

$$D_{cd} = 1 \cdot Q^{1/3} \quad (\gamma \leq 50 \text{ kg/m}^3)$$

$$D_{cd} = 2 \cdot Q^{1/3} \quad (\gamma > 50 \text{ kg/m}^3)$$

όπου γ η πυκνότητα αποθήκευσης (kg αποθηκευμένης εκρηκτικής ύλης ανά m^3 αποθηκευτικού όγκου θαλάμου).

(για $\gamma \leq 50 \text{kg/m}^3$ αν $Q=200.000 \text{kg}$ τότε $D_{cd} = 1 \cdot 58,48 = 58,5 \text{m}$)

Για μαλακό πέτρωμα και για όλες τις πυκνότητες γ , ισχύει

$$D_{cd} = 1,4 \cdot Q^{1/3}$$

(αν $Q=200.000 \text{kg}$ τότε $D_{cd} = 1,4 \cdot 58,48 = 82 \text{m}$)

Αν ένα επίπεδο ζημίας στα πυρομαχικά, από τις αποκολλήσεις τεμαχών στις παρειές του θαλάμου, είναι αποδεκτό, η απόσταση διαχωρισμού των θαλάμων μπορεί να μειωθεί στην απαιτούμενη απόσταση για την αποφυγή διάδοσης της έκρηξης στον γειτονικό θάλαμο. Στην περίπτωση που δεν υφίστανται διατάξεις προστασίας ενάντια στις αποκολλήσεις και για πυκνότητες αποθήκευσης μέχρι 270kg/m^3 ισχύει ο τύπος:

$$D_{cd} = 0,6 \cdot Q^{1/3}$$

(αν $Q=200.000 \text{kg}$ τότε $D_{cd} = 0,6 \cdot 58,48 = 35 \text{m}$)

Όταν έχουν χρησιμοποιηθεί διατάξεις ενάντια στις αποκολλήσεις, η απόσταση πρέπει να καθορίζεται σε κάθε κατασκευή με επιτόπου δοκιμές. Ωστόσο γενικά ισχύει:

$$D_{cd} = 0,3 \cdot Q^{1/3}$$

(αν $Q=200.000 \text{kg}$ τότε $D_{cd} = 0,3 \cdot 58,48 = 17,50 \text{m}$)

β) Για την αποφυγή της μεταφοράς του αέριου ωστικού κύματος και της θερμότητας πρέπει στις συνδετήριες σήραγγες να τοποθετούνται κατάλληλες αντiekρηκτικές θύρες.

γ) Οι δυνάμεις που ασκούνται στο περιβάλλον πέτρωμα από την έκρηξη μπορεί να οδηγήσουν στην αστοχία του και να δημιουργήσουν ρωγμές που να εκκινούνται από τον θάλαμο έκρηξης έως ένα γειτονικό θάλαμο. Από αυτές τις ρωγμές είναι δυνατό να περάσουν αέρια της έκρηξης και να προκαλέσουν λόγω υψηλών θερμοκρασιών νέα έκρηξη στον γειτονικό θάλαμο. Οι παράγοντες που επηρεάζουν αυτή τη διαδικασία είναι η αντοχή του πετρώματος, η έκταση και το μέγεθος των προϋπάρχουσων ρωγμών, το μέγεθος (όγκος) του θαλάμου κ.α. Η απόσταση μεταξύ των θαλάμων για να αποφευχθεί η διάδοση της έκρηξης μέσω των ρωγμών πρέπει να είναι μεγαλύτερη από

$$D_{cd} = 0,3 \cdot Q^{1/3}$$

(αν $Q=200.000\text{kg}$ τότε $D_{cd} > 0,3 \cdot 58,48 = 17,50\text{m}$)

και μικρότερη από

$$D_{cd} = 2 \cdot Q^{1/3}$$

(αν $Q=200.000\text{kg}$ τότε $D_{cd} < 2 \cdot 58,48 = 117\text{m}$)

4.5.6. Απόσταση Κατοικήσιμων Κατασκευών (IBD)

Η αποδεκτή κατά τον σχεδιασμό IBD είναι η μεγαλύτερη των αποστάσεων ασφαλείας για προστασία των κατοικήσιμων κατασκευών από το αέριο ωστικό κύμα, τα θραύσματα και τις δονήσεις του εδάφους. Τα ενδεδειγμένα κριτήρια σχεδιασμού εντός της IBD είναι

Υπερπίεση έκρηξης: 5Kpa

Θραύσματα και συντρίμμια: 1 επικίνδυνο θραύσμα ανά 56m^2

4.5.6.1. Υπολογισμός IBD για τους κινδύνους από το αέριο ωστικό κύμα

Η πλευρική υπερπίεση των 5 kPa, καθορίζει την IBD. Μια έκρηξη σε έναν υπόγειο θάλαμο αποθήκευσης, έχει ως αποτέλεσμα την έξοδο του ωστικού κύματος από υπάρχοντα ανοίγματα (είσοδοι των σηράγγων, φρεάτια εξαερισμού, κλπ). Ο υπολογισμός της IBD χωρίζεται σε τρία βήματα:

- Υπολογισμός της πίεσης στην έξοδο του θαλάμου.
- Υπολογισμός της πίεσης στη έξοδο της σήραγγας.
- Υπολογισμός της IBD.

Η υπερπίεση που δημιουργείται στον θάλαμο που έγινε η έκρηξη μπορεί να υπολογιστεί με τον παρακάτω τύπο:

$$p_c = 1200 \cdot \left[\frac{Q}{V_c} \right]^{2/3}$$

Όπου p_c : η υπερπίεση στον θάλαμο, kpa

Q : η μάζα των εκρηκτικών υλών, kg

V_c : ο όγκος του θαλάμου που έχει καταληφθεί από το εκρηκτικό κύμα τη στιγμή που το αέριο ωστικό κύμα φτάνει στο σημείο ενδιαφέροντος – λαμβάνεται ίσος με τον όγκο του θαλάμου, m^3

Η μείωση της μέγιστης υπερπίεσης και η αλλαγή της διάρκειας από την έξοδο του θαλάμου έως την έξοδο της κύριας σήραγγας, υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τα παρακάτω διαγράμματα που αντιστοιχούν σε πιθανές διαμορφώσεις της σήραγγας.

Οι ακόλουθοι τύποι και τα διαγράμματα στις Εικόνες .. και ... χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της μείωσης της μέγιστης υπερπίεσης κατά μήκος μιας σήραγγας (στοιχείο τριβής) με μια σταθερή διατομή και χωρίς διασταυρώσεις και στροφές.

$$L_R = L_S - 5 \cdot d_0$$

$$\chi = \alpha \cdot L_R$$

$$t_1 = 20 \cdot (L_k)^{2/3} \cdot (d_0)^{1/3} \cdot (d_k/d_0)^2$$

$$\tau = \alpha \cdot t_1$$

όπου L_R = Ενεργό μήκος της σήραγγας (m)

L_S = Μήκος της σήραγγας ή τμήματος της σήραγγας (m)

d_0 = Μέση ισοδύναμη διάμετρο της σήραγγας (m)

χ = Συντελεστής για την απόσταση (m)

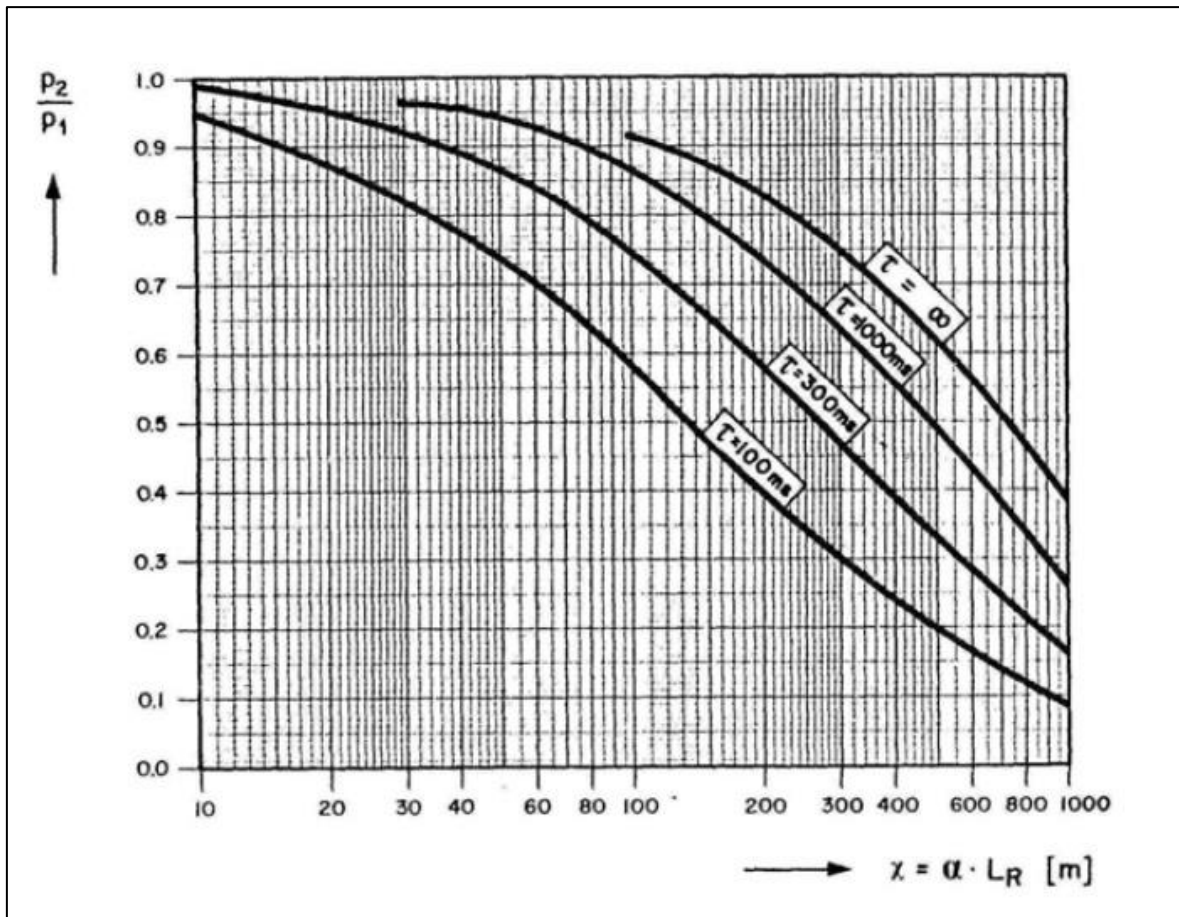
α = Συντελεστής τριβής: σκυρόδεμα ($\alpha=1$), εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ($\alpha=4$), βράχος ($\alpha=6$)

t_1 = Διάρκεια του κύματος στην έξοδο του θαλάμου (ms)

L_k = Μήκος θαλάμου (m)

d_k = Μέση ισοδύναμη διάμετρος του θαλάμου (m)

Υπολογίζοντας τα (χ) και (τ) από τους ανωτέρω τύπους μπορούμε μέσω του διαγράμματος να βρούμε το ποσοστό απομείωσης της πίεσης κατά μήκος της σήραγγας (p_2/p_1). p_1 και p_2 είναι η μέγιστη υπερπίεση στην αρχή, και στο αντίστοιχο τέλος του στοιχείου της σήραγγας (atm).

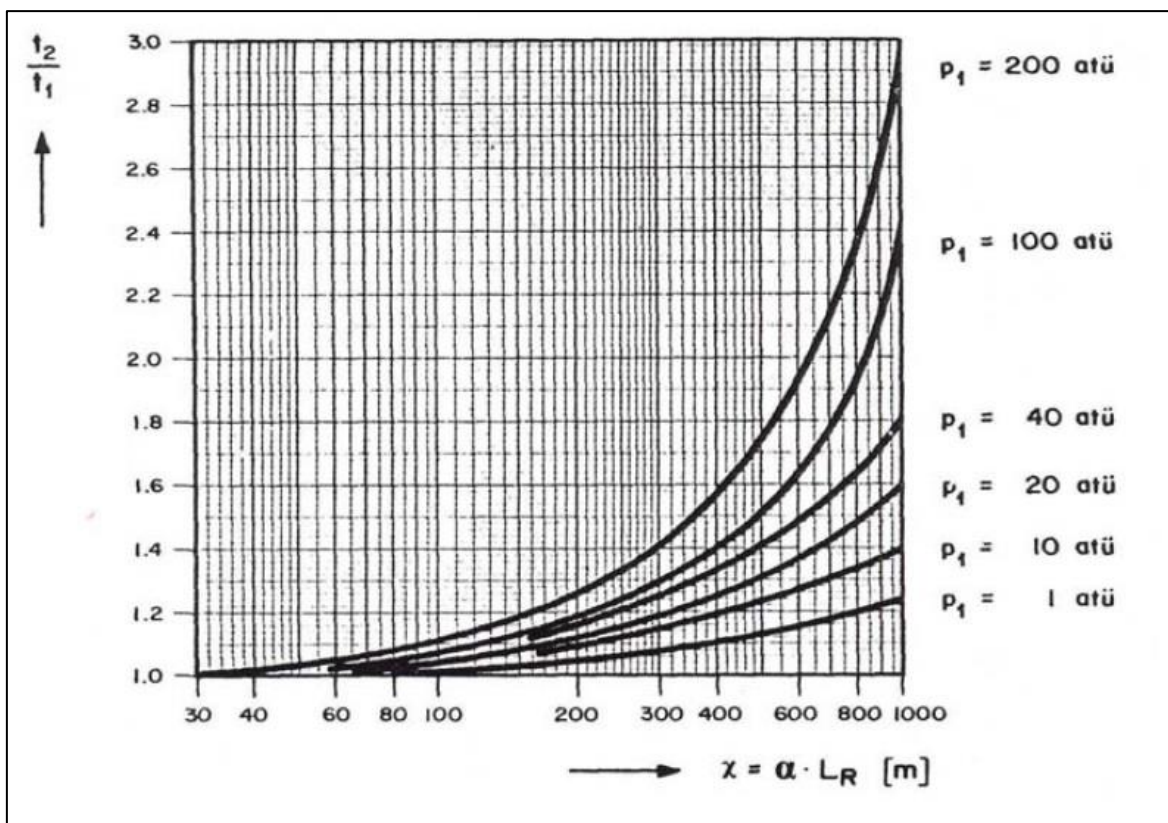


Εικόνα 27: Διάγραμμα υπολογισμού απομείωσης πίεσης στη σήραγγα

Επίσης μπορεί να υπολογιστεί και η αλλαγή στην διάρκεια του κύματος. Εάν η διάρκεια στην έξοδο του θαλάμου t_1 είναι μικρότερη από 1.000 ms, τότε

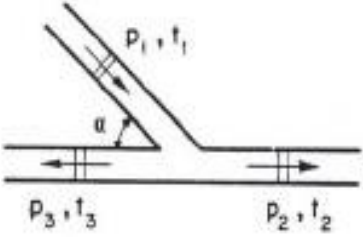
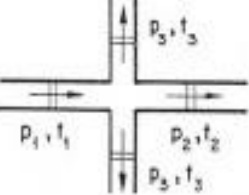
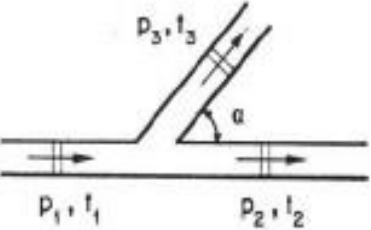
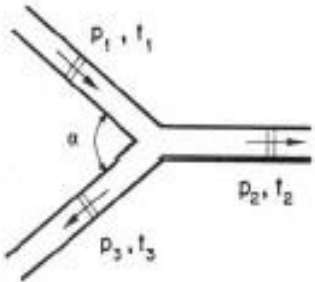
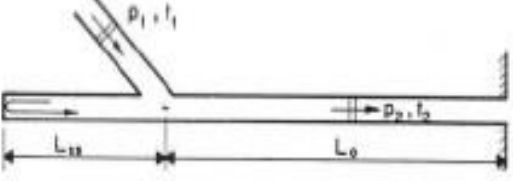
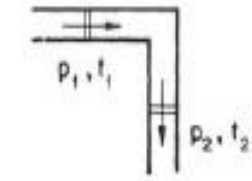
$$t_2 = t_1 \cdot p_1/p_2$$

Εάν $t_1 > 1.000$ ms, τότε η αλλαγή της διάρκειας στη σήραγγα, υπολογίζεται μέσω του ακόλουθου διαγράμματος.

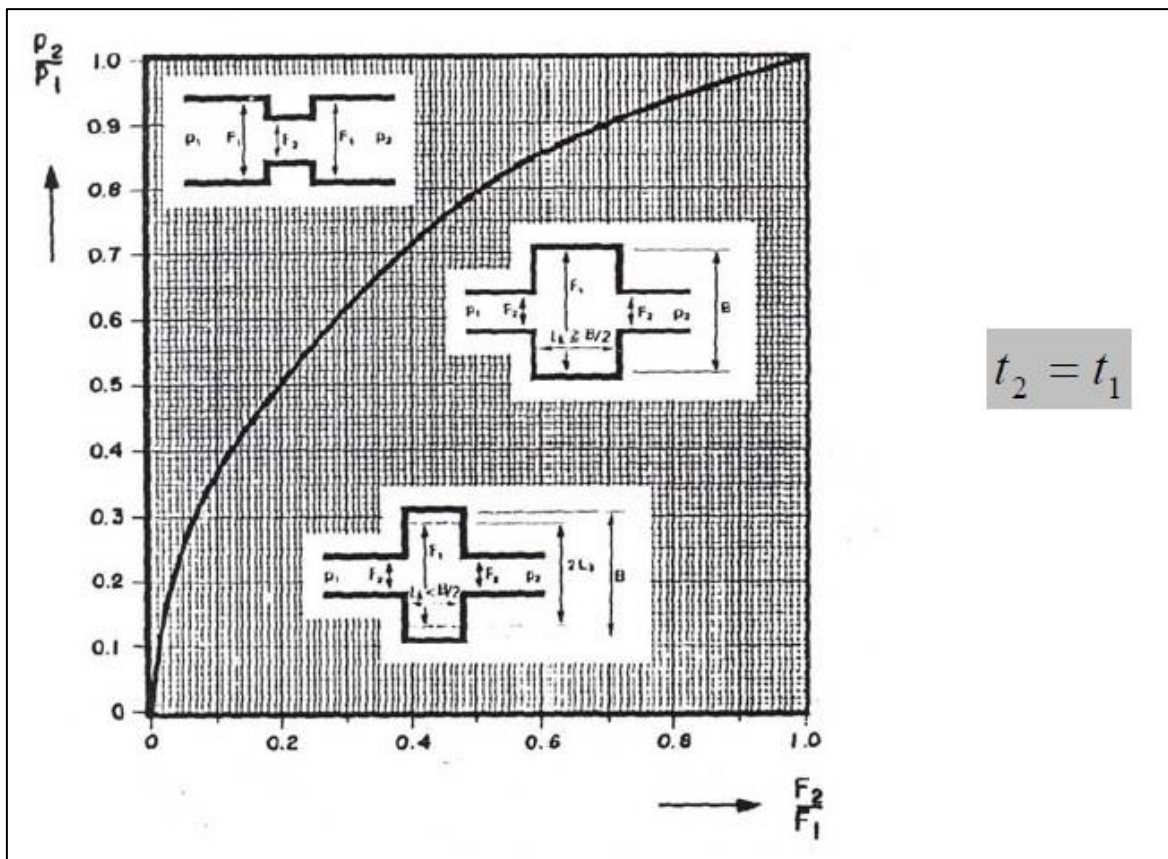


Εικόνα 28: Διάγραμμα υπολογισμού μείωσης διάρκειας t στη σήραγγα

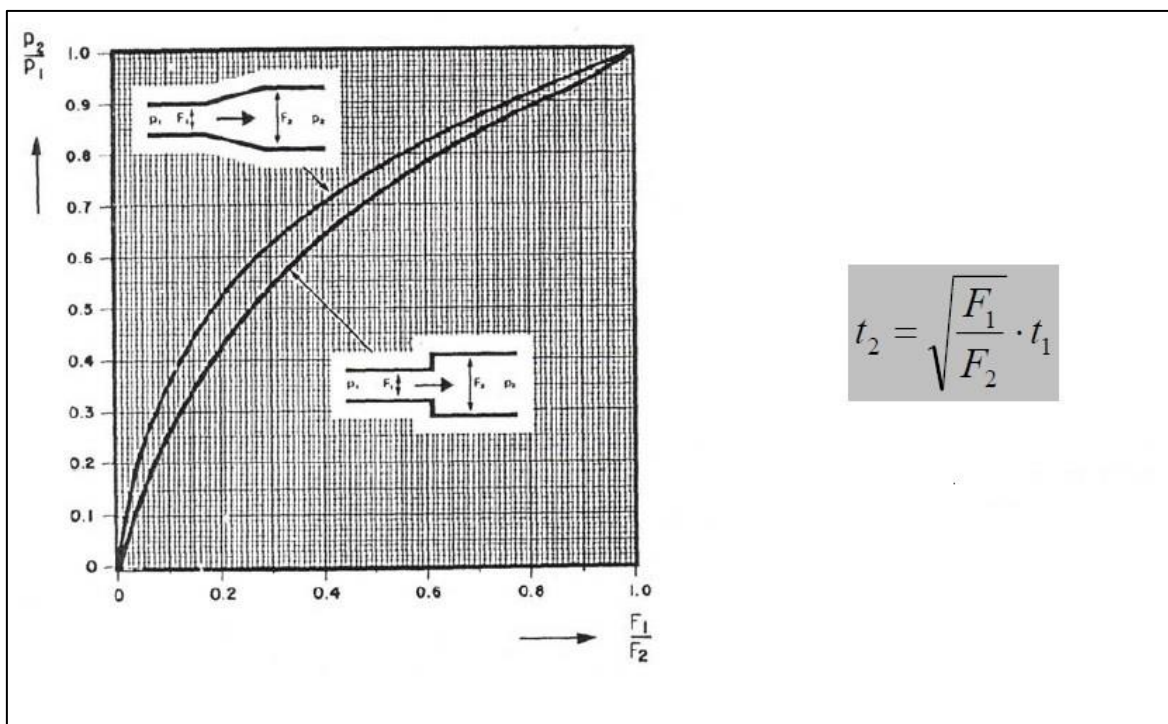
Στην παρακάτω εικόνα δίνονται διάφορες πιθανές διασταυρώσεις / διακλαδώσεις της σήραγγας και ο τρόπος υπολογισμού της μείωσης της πίεσης και της διάρκειας. Ακολουθούν διαγράμματα για την εύρεση του λόγου (p_2/p_1) στις περιπτώσεις στενώσεων, θαλάμων αποτόνωσης και αλλαγών στη διατομή της σήραγγας.

	$p_2 = \sqrt{1 - \frac{\alpha}{180^\circ}} \cdot p_1$ $p_3 = \sqrt{\frac{\alpha}{180^\circ}} \cdot p_1$ $t_2 = t_3 = 0.7 \cdot t_1$
	$p_2 = 0.8 \cdot p_1$ $p_3 = 0.25 \cdot p_1$ $t_2 = t_3 = 0.7 \cdot t_1$
	$p_2 = 0.8 \cdot p_1$ $p_3 = 0.8 \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{180^\circ}\right) \cdot p_1$ $t_2 = t_3 = 0.7 \cdot t_1$
	$p_2 = \left(0.9 - 0.6 \cdot \left(\frac{\alpha}{180^\circ}\right)^2\right) \cdot p_1$ $p_3 = \left(0.2 + 0.6 \cdot \frac{\alpha}{180^\circ}\right) \cdot p_1$ $t_2 = t_3 = 0.7 \cdot t_1$
	<p>If $L_0 \geq 2 \cdot L_{12}$</p> $p_2 = 0.9 \cdot p_1$ $t_2 = t_1$ <p>If $L_0 < 2 \cdot L_{12}$</p> <p>use tunnel elements (junctions) above</p>
	$p_2 = 0.9 \cdot p_1$ $t_2 = t_1$

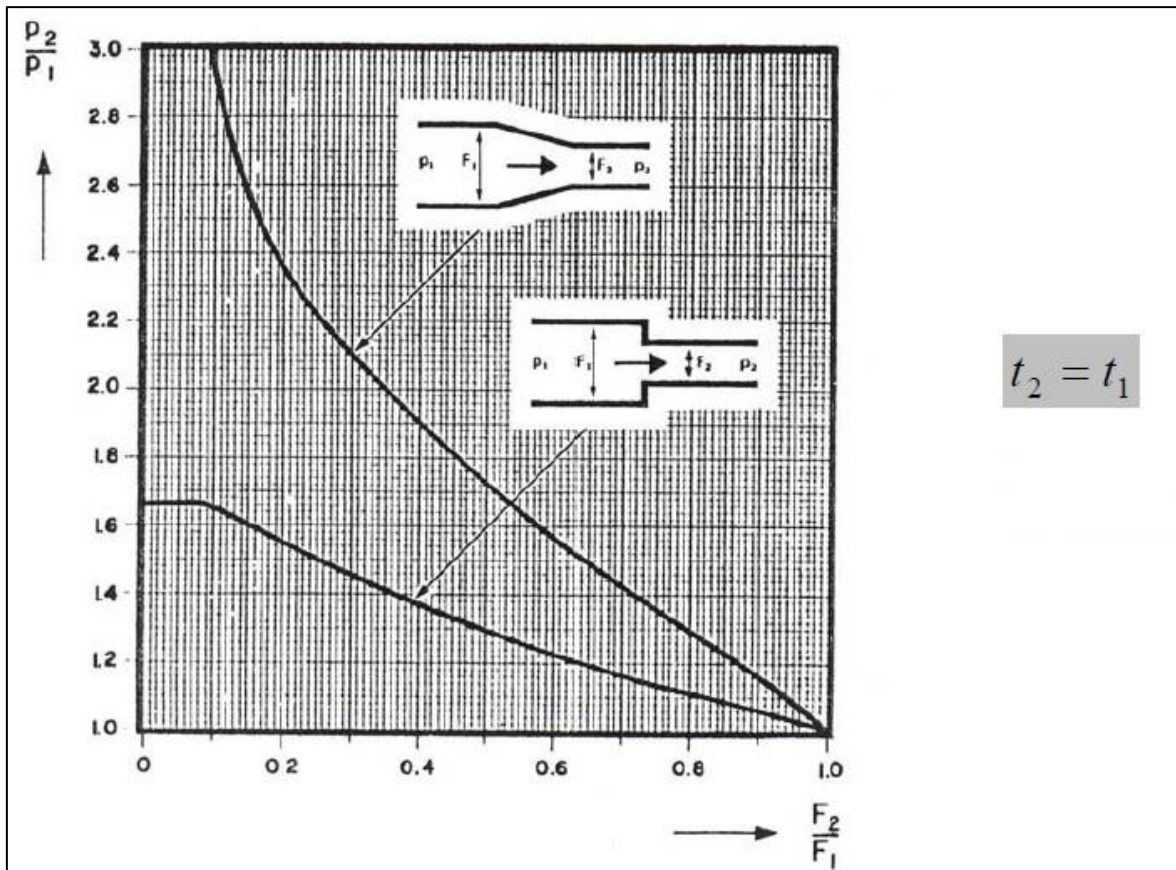
Εικόνα 29: Υπολογισμός αλλαγών σε πίεση και διάρκεια κατά τη διακλάδωση σήραγγας.



Εικόνα 30: Διάγραμμα υπολογισμού λόγου p_2/p_1 σε στενώσεις και θαλάμους αποτόνωσης.



Εικόνα 31: Διάγραμμα υπολογισμού λόγου p_2/p_1 στις αλλαγές διατομή της σήραγγας.



Εικόνα 32: Διάγραμμα υπολογισμού λόγου p_2/p_1 στις αλλαγές διατομή της σήραγγας.

Η προκύπτουσα πίεση στη έξοδο του υπόγειου χώρου p_e είναι:

$$p_e = p_c \cdot \left[\frac{p_2}{p_1} \right] \cdot \left[\frac{p_3}{p_2} \right] \left[\frac{p_n}{p_{n-1}} \right]$$

Η απαιτούμενη απόσταση IBD υπολογίζεται από τον τύπο:

$$IBD = 1.64 \cdot d_{te} \cdot \left[\frac{p_e}{5.0} \right]^{0.74}$$

όπου d_{te} η ισοδύναμη διάμετρος στην έξοδο της σήραγγας $d_{te} = \sqrt{4A/\pi}$

Η ανωτέρω υπολογιζόμενη τιμή IBD ισχύει μόνο για ευθεία γραμμή επέκτασης του άξονα της σήραγγας εισόδου του υπόγειου χώρου. Για απλή γεωμετρία (χωρίς οδοφράγματα, ραγδαίες ανυψώσεις κα) η επόμενη εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για έναν μη κεντρικό άξονα.

$$IBD(\theta) = IBD(\theta=0) [1+(\theta/56)^2]^{-0,74}$$

όπου θ = η οριζόντια γωνία με τον άξονα της σήραγγας σε μοίρες.

Στην περίπτωση που στην είσοδο του θαλάμου έχει κατασκευαστεί μηχανισμός κλεισίματος (μπλοκ) σχεδιασμένος να μην καταστρέφεται κατά την έκρηξη τότε για θαλάμους με πυκνότητα αποθήκευσης μεγαλύτερη ή ίση με 10kg/m^3 , η IBD πρέπει να μειώνεται κατά 50%. Για θαλάμους με πυκνότητα αποθήκευσης μικρότερο των 10kg/m^3 , η μείωση υπολογίζεται με τον τύπο:

$$y(\%) = 50 \log_{10}(\gamma)$$

όπου γ η πυκνότητα αποθήκευσης σε kg/m^3 . Για $\gamma < 1\text{kg/m}^3$ λαμβάνουμε $y(\%)=0$.

Στην περίπτωση που έχει κατασκευαστεί οδοφράγμα μετά την έξοδο του υπόγειου χώρου, η IBD κατά μήκος του άξονα της σήραγγας μπορεί να μειωθεί έως και 50%.

4.5.6.2. Υπολογισμός IBD για τους κινδύνους από τα θραύσματα

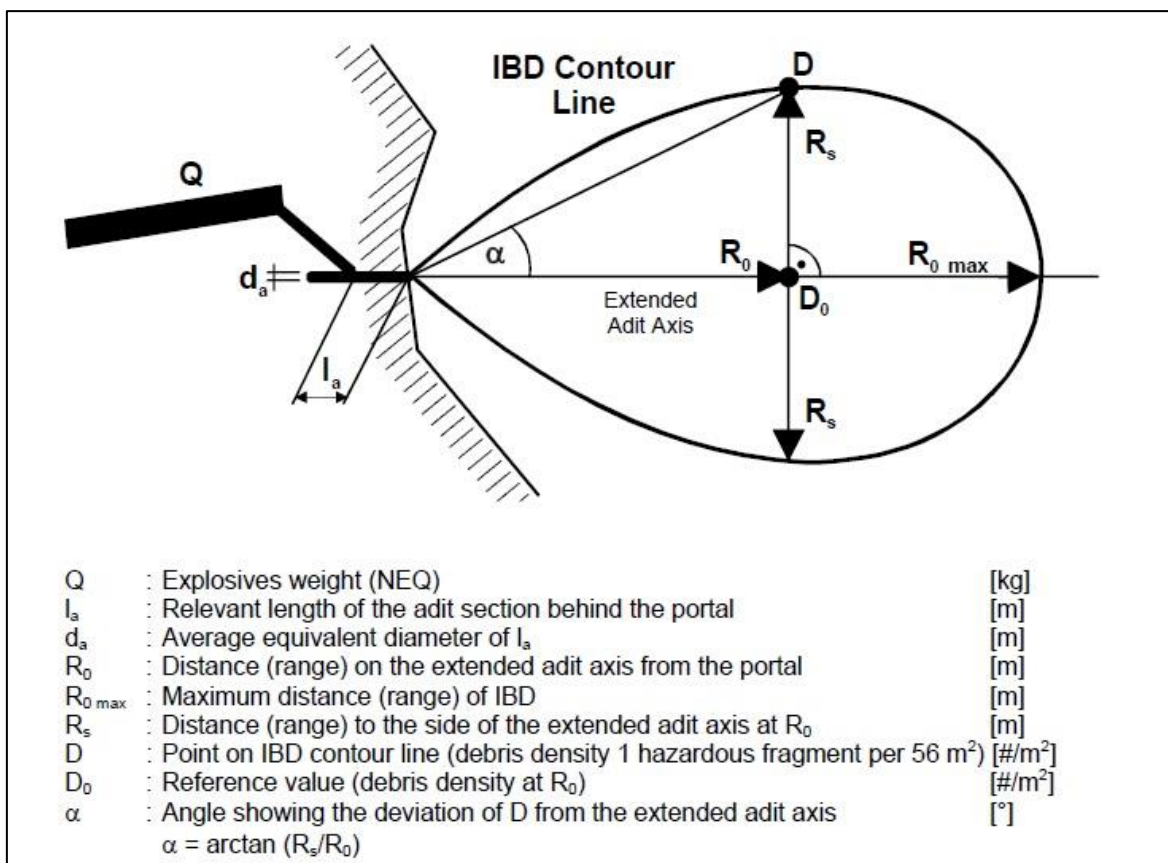
Τα συντρίμμια από μια έκρηξη σε μια υπόγεια εγκατάσταση, μπορούν να προέρχονται από είτε από τη σήραγγα εξόδου και τα υπόλοιπα ανοίγματα τις κατασκευής, από την κατάρρευση των γειτονικών κατασκευών και τη δημιουργία κρατήρα με την κατάρρευση των υπερκειμένων στην περιοχή της έκρηξης.

1) Τα θραύσματα που εκτινάσσονται από τα ανοίγματα του υπόγειου χώρου αποτελούν ένα από τους μεγαλύτερους κινδύνους σε περίπτωση έκρηξης σε υπόγεια εγκατάσταση. Τα συντρίμμια των στοών αποτελούνται από κομμάτια πυρομαχικών και των συσκευασιών τους, τμήματα των μηχανολογικών εγκαταστάσεων (όπως εξοπλισμός εξαερισμού), πόρτες, εξοπλισμός πυρόσβεσης, επένδυση του θαλάμου ή των σηράγγων, άλλα δομικά στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος, καθώς επίσης και συντρίμμια από το πέτρωμα που παρίχθησαν από τα αποτελέσματα της έκρηξης. Όλα αυτά τα κομμάτια επιταχύνονται από τα αέρια της έκρηξης, διαφεύγουν από την εγκατάσταση και ρίχνονται στη γύρω περιοχή, μπροστά από την έξοδο του υπόγειου χώρου.

Τα χαρακτηριστικά της εκτίναξης των θραυσμάτων, κυρίως εξαρτώνται από το βάρος των εκρηκτικών Q που αποθηκεύονται στην εγκατάσταση και τη γεωμετρία της σήραγγας που οδηγεί στην έξοδο (αναλογία μήκους προς διάμετρο – l_a/d).

Άλλοι παράγοντες, όπως η πυκνότητα αποθήκευσης (βάρος εκρηκτικών/θαλάμου ή όγκος συστήματος), το κέντρο της έκρηξης στον θάλαμο, η κατασκευή της περιοχής εξόδου και η γεωμετρία της σήραγγας μπορεί να επηρεάσουν τον τρόπο εκτίναξης των θραυσμάτων στον εξωτερικό χώρο. Όμως, τα διαθέσιμα δεδομένα από δοκιμές και ατυχήματα είναι ανεπαρκή για να αντληθούν αξιόπιστες σχέσεις.

Η IBD που υπολογίζεται βάση των θραυσμάτων δεν είναι μία απόσταση αλλά μία περιοχή στην οποία η πυκνότητα θραυσμάτων είναι ένα επικίνδυνο θραύσμα (ενέργεια μεγαλύτερη από 79Joules) ανά 56m² (≈ 0.0179 θραύσμα/m²). Το γενικό σχήμα της περιβάλλουσας την περιοχή φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



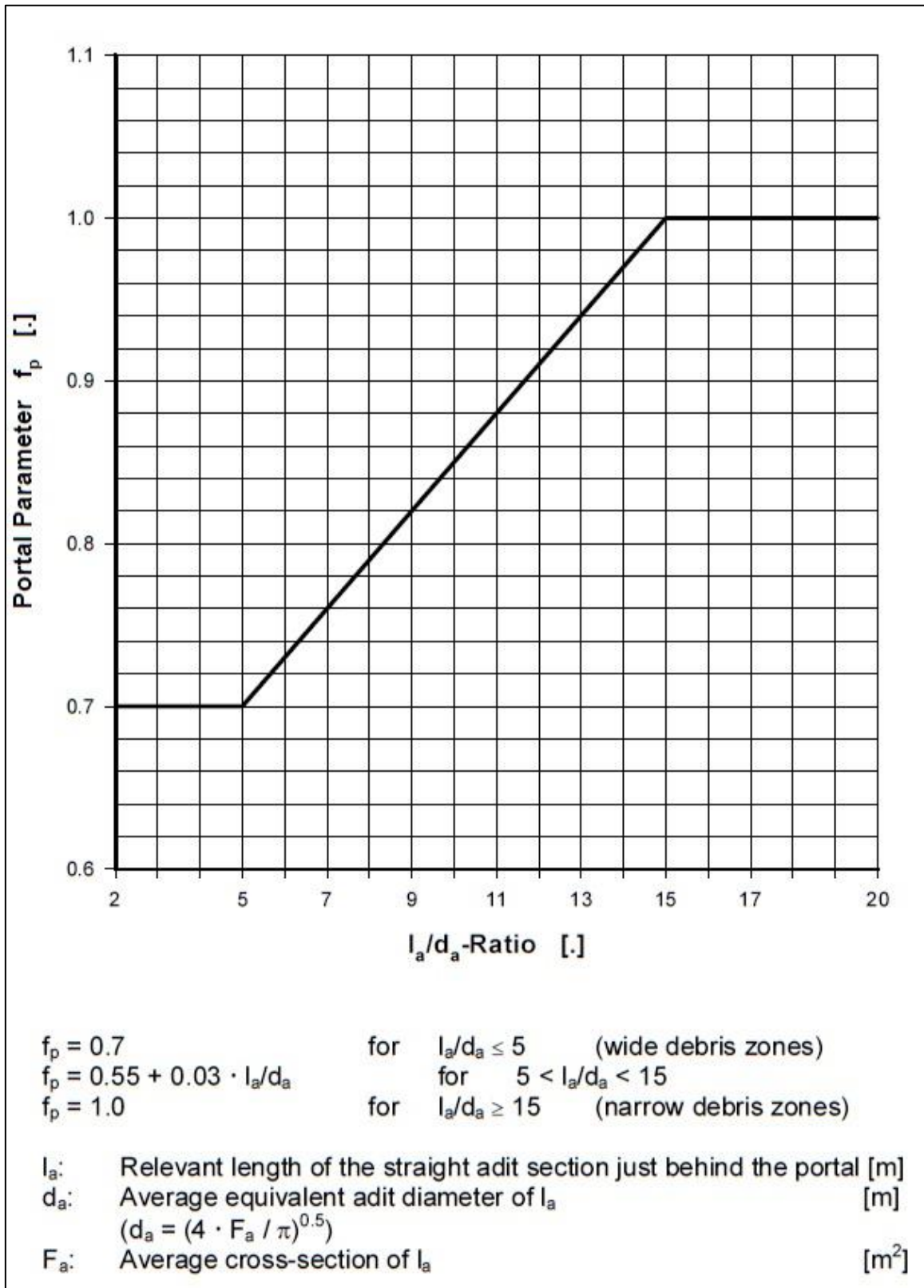
Εικόνα 33: Περιβάλλουσα IBD από θραύσματα

Δεν υπάρχει κανένας κλειστός τύπος για τον υπολογισμό του σχήματος της περιβάλλουσας. Γι' αυτό, αυτή πρέπει να κατασκευαστεί σταδιακά, σημεία ανά σημεία. Το μέγεθος και το σχήμα της επηρεάζεται από τις ακόλουθες παραμέτρους:

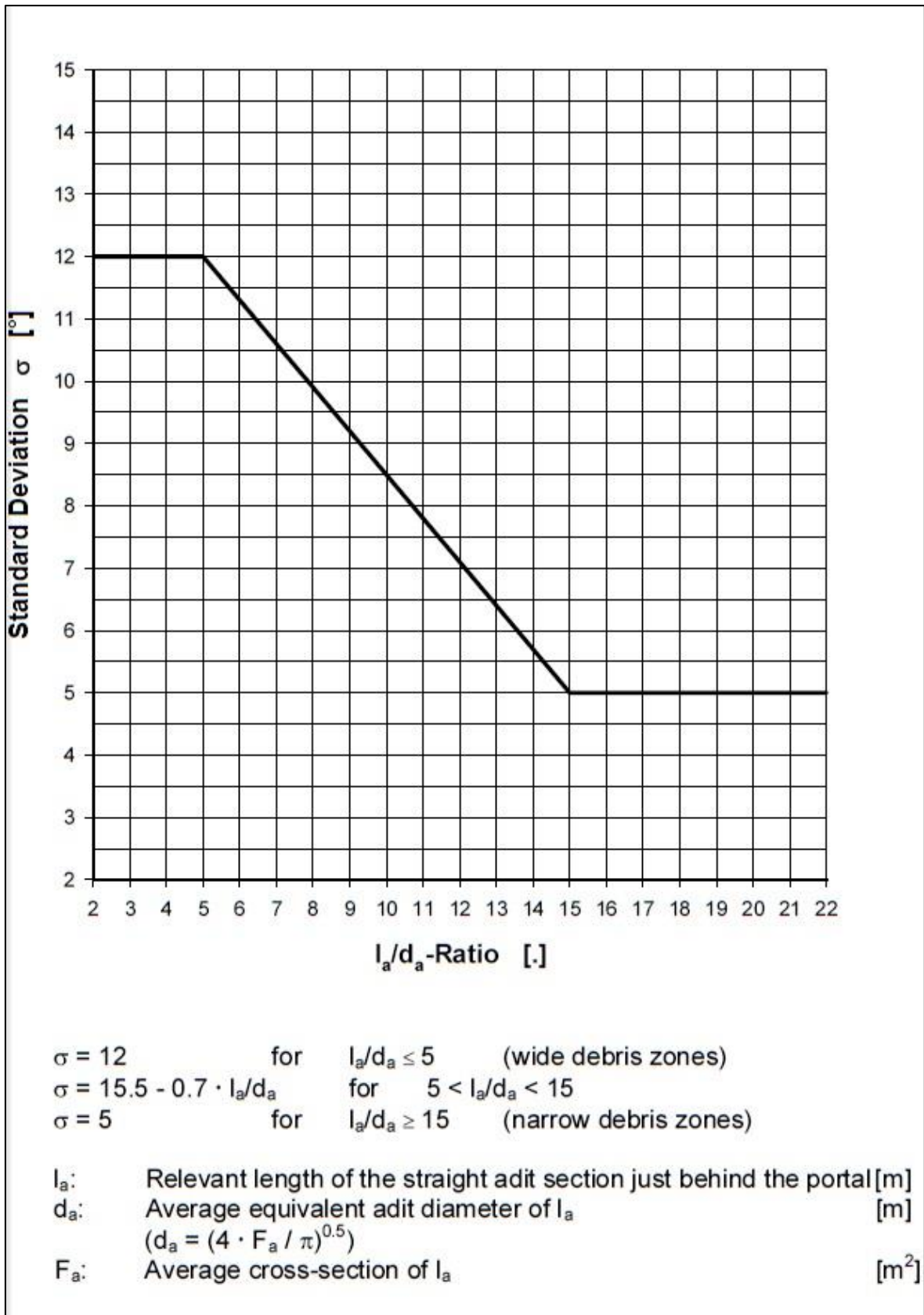
- $Q = \text{NEQ}$ (kg) καθαρό βάρος εκρηκτικής ύλης που περιέχουν τα αποθηκευμένα πυρομαχικά
- l_a (m) σχετικό μήκος της σήραγγας ακριβώς πίσω από την είσοδο του υπόγειου χώρου
- d_a (m) μέση ισοδύναμη διάμετρος της σήραγγας στην είσοδο

Ο λόγος l_a/d_a υπολογίζεται όπως φαίνεται στα παραδείγματα της Εικόνας 32 και καθορίζει την τιμή της παραμέτρου f_p και της τυπικής απόκλισης σ . Η παράμετρος f_p λαμβάνει υπόψη ότι μία μεγάλη σε μήκος και μικρή σε διατομή σήραγγα εξόδου οδηγεί σε περισσότερο συγκεντρωμένα θραύσματα κατά την εκτόξευση από ότι μία μικρή σε μήκος και με μεγάλη διατομή σήραγγα. Υψηλές τιμές του λόγου l_a/d_a έχουν ως αποτέλεσμα μακριές αλλά στενές περιοχές IBD. Η

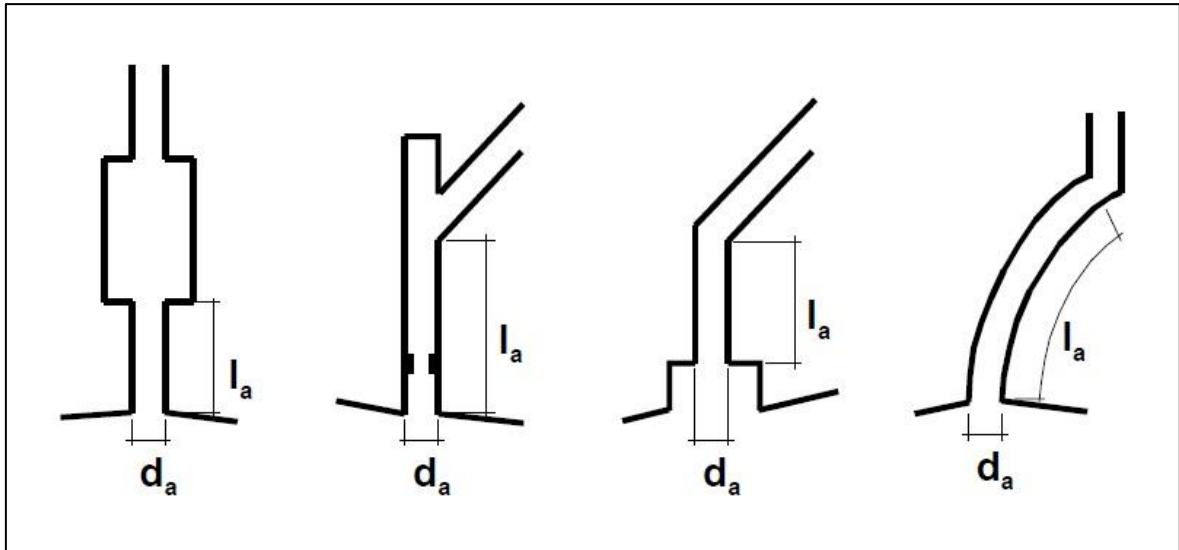
παράμετρος f_p καθορίζει το μήκος της περιοχής IBD ενώ η τυπική απόκλιση στο πλάτος της. Οι f_p και σ υπολογίζονται από τα ακόλουθα διαγράμματα ενώ στον πίνακα της Εικόνας 37 δίνονται τιμές τους για διάφορες τιμές του λόγου l_a/d_a .



Εικόνα 34: Διάγραμμα $f_p - l_a/d_a$



Εικόνα 35: Διάγραμμα $\sigma - I_a/d_a$



Εικόνα 36: Τρόποι υπολογισμού του λόγου l_a/d_a

Η μέγιστη εμβέλεια των θραυσμάτων $R_{o\max}$ υπολογίζεται από τον τύπο

$$R_{o\max} = f_p \cdot \frac{-4.025 - A}{B}$$

όπου $A = -5,25 + 1,0 \cdot \ln(Q)$

$$B = -0,0085 - 0,25/\sqrt{Q}$$

Τιμές για τα A, B και f_p για τυπικές ποσότητες Q δίνονται στον πίνακα της Εικόνας 37.

Η πυκνότητα των θροισμάτων D_0 στο σημείο R_0 (που αντιπροσωπεύει την εμβέλεια των θραυσμάτων στην ευθεία του άξονα της σήραγγας) είναι

$$D_0 = \exp(A + B \cdot R_0/f_p) \quad (\text{θραύσμα}/\text{m}^2)$$

Για ένα αριθμό τιμών του R_0 (8 έως 12 τιμές) βρίσκουμε τα αντίστοιχα D_0 . Οι τιμές του R_0 επιλέγονται ελεύθερα αρκεί να ισχύει $R_0 < R_{o\max}$.

Η γωνία α μεταξύ της ευθείας του άξονα και του σημείου D_0 πάνω στην περιβάλλουσα είναι

$$\alpha = \sqrt{-2 \cdot \ln\left(\frac{0.0179}{D_0}\right) \cdot \sigma^2}$$

Από το τρίγωνο που σχηματίζεται υπολογίζουμε την απόσταση R_s

$$R_s = R_0 \cdot \tan(\alpha)$$

Ο πίνακας της Εικόνας 38 είναι βοηθητικός για τον υπολογισμό των ανωτέρω εξισώσεων.

Κάθε συνδυασμός R_0 και R_s καθορίζει ένα σημείο πάνω στην περιβάλλουσα καμπύλη της περιοχής IBD, όπου η πυκνότητα των θραυσμάτων είναι $1/56 \text{ m}^2$. Η καμπύλη σχεδιάζεται ξεκινώντας από την έξοδο του υπόγειου χώρου, ενώνοντας τα σημεία που υπολογίσαμε και καταλήγοντας πάλι στην έξοδο.

Στην περίπτωση που μπροστά στην έξοδο του υπόγειου έργου έχει κατασκευαστεί ένα αποτελεσματικό οδόφραγμα η μορφή της περιβάλλουσας αλλάζει και προσεγγίζει ένα ημικύκλιο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 39. Ανεξάρτητα από την τιμή του λόγου I_a/a_d η παράμετρος f_p λαμβάνει την τιμή 0,4. Επισημαίνεται ότι τόσο για τα οδοφράγματα όσο και άλλες διατάξεις περιορισμού των θραυσμάτων πρέπει να είναι κατάλληλα σχεδιασμένες και κατασκευασμένες ώστε να αντέχουν την έκρηξη. Σε διαφορετική περίπτωση θα ρωγματοθωθούν ή θα καταρρεύσουν με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν περισσότερα θραύσματα και να αυξηθεί ο κίνδυνος για οσους βρίσκονται στον εξωτερικό χώρο.

Στην περίπτωση που ο υπόγειος χώρος έχει δύο σήραγγες εξόδου (για λόγους ασφαλείας) ο υπολογισμός της περιβάλλουσας IBD πρέπει να γίνει και για τις δύο.

Ιδιαίτερες προφυλάξεις πρέπει να λαμβάνονται στην περίπτωση που ο υπόγειος αποθηκευτικός χώρος ξεπερνά τα κάτωθι όρια:

- NEQ 100 – 500.000 kg
- $\gamma_c 1 – 100 \text{ kg/m}^3$

Όταν η κατασκευή είναι κάτω από τα όρια οι υπολογισμοί παράγουν μία συντηρητική / μεγάλη IBD, ενώ δεν υπάρχουν στοιχεία για τις άνω των ορίων κατασκευές.

NEQ [kg]	A [.]	B [.]	l_a/d_a -Ratio [.]	f_p [.]	σ [°]
100	-0.645	-0.0335	2.0	0.700	12.0
200	0.0483	-0.0262	3.0	0.700	12.0
300	0.454	-0.0229	4.0	0.700	12.0
400	0.741	-0.0210	5.0	0.700	12.0
500	0.965	-0.0197	5.5	0.715	11.7
600	1.15	-0.0187	6.0	0.730	11.3
700	1.30	-0.0179	6.5	0.745	11.0
800	1.43	-0.0173	7.0	0.760	10.6
900	1.55	-0.0168	7.5	0.775	10.3
1'000	1.66	-0.0164	8.0	0.790	9.90
2'000	2.35	-0.0141	8.5	0.805	9.55
3'000	2.76	-0.0131	9.0	0.820	9.20
4'000	3.04	-0.0125	9.5	0.835	8.85
5'000	3.27	-0.0120	10.0	0.850	8.50
6'000	3.45	-0.0117	10.5	0.865	8.15
7'000	3.60	-0.0115	11.0	0.880	7.80
8'000	3.74	-0.0113	11.5	0.895	7.45
9'000	3.85	-0.0111	12.0	0.910	7.10
10'000	3.96	-0.0110	12.5	0.925	6.75
20'000	4.65	-0.0103	13.0	0.940	6.40
30'000	5.06	-0.00994	13.5	0.955	6.05
40'000	5.35	-0.00975	14.0	0.970	5.70
50'000	5.57	-0.00962	14.5	0.985	5.35
60'000	5.75	-0.00952	15.0	1.00	5.00
70'000	5.91	-0.00944	16.0	1.00	5.00
80'000	6.04	-0.00938	17.0	1.00	5.00
90'000	6.16	-0.00933	18.0	1.00	5.00
100'000	6.26	-0.00929	19.0	1.00	5.00
200'000	6.96	-0.00906	> 20.0	1.00	5.00
300'000	7.36	-0.00896			
400'000	7.65	-0.00890			
500'000	7.87	-0.00885			

Linear interpolation between values is permitted; but it may lead to deviations of up to 3%, compared to the real values calculated with the corresponding formula

(for NEQ < 300 kg, the deviation of interpolation of parameter A is even larger)

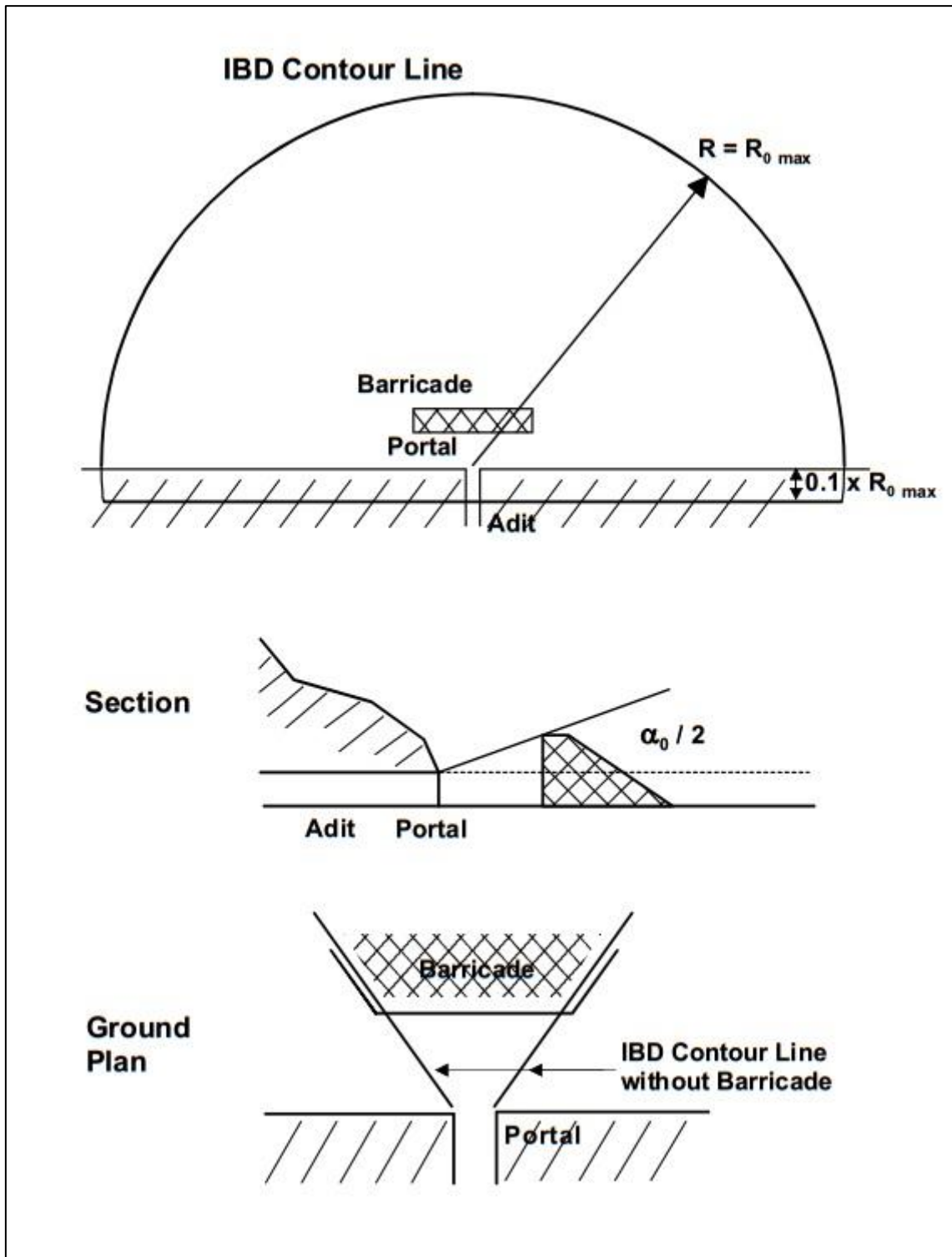
Εικόνα 37: Πίνακας τιμών για τα A, B, f_p και σ

$x =$ $A + B \times R_0 / f_p$	$D_0 = e^x$ [pieces/m ²]	$x =$ $0.0179 / D_0$	$\ln(x)$ [.]	α [°]	$\tan(\alpha)$
-6.0	0.00248	7.5	2.015	0	0.0000
-5.5	0.00409	5.0	1.609	2	0.0349
-5.0	0.00674	3.0	1.099	4	0.0699
-4.5	0.0111	2.0	0.693	6	0.1051
-4.0	0.0183	1.0	0.000	8	0.1405
-3.5	0.0302	0.75	-0.288	10	0.1763
-3.0	0.0498	0.50	-0.693	12	0.2126
-2.5	0.0821	0.30	-1.204	14	0.2493
-2.0	0.1353	0.20	-1.609	16	0.2867
-1.5	0.2231	0.10	-2.303	18	0.3249
-1.0	0.3679	0.075	-2.590	20	0.3640
-0.5	0.6065	0.050	-2.996	22	0.4040
0.0	1.000	0.030	-3.507	24	0.4452
0.5	1.649	0.020	-3.912	26	0.4877
1.0	2.718	0.010	-4.605	28	0.5317
1.5	4.482	0.0075	-4.893	30	0.5774
2.0	7.389	0.0050	-5.298	32	0.6249
2.5	12.18	0.0030	-5.809	34	0.6745
3.0	20.09	0.0020	-6.215	36	0.7265
3.5	33.12	0.0010	-6.908	38	0.7813
4.0	54.60	0.00075	-7.195	40	0.8391
4.5	90.02	0.00050	-7.601	42	0.9004
5.0	148.4	0.00030	-8.112	46	1.036
5.5	244.7	0.00020	-8.517	48	1.111
6.0	403.4	0.00010	-9.210	50	1.192
6.5	665.1	0.000075	-9.498	52	1.280
7.0	1097	0.000050	-9.903	54	1.376
		0.000030	-10.41	58	1.600
		0.000020	-10.82	60	1.732

Linear interpolation between values is permitted; but it may lead to deviations of up to 3%, compared to the real values calculated with the corresponding formulas

(for the natural logarithm close to $x=1$, the deviation of interpolation is even larger)

Εικόνα 38: Βοηθητικός πίνακας τιμών για τις εξισώσεις των α και R_s



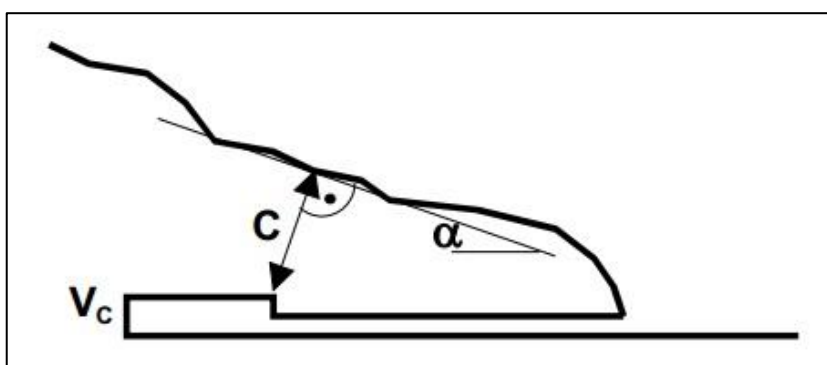
Εικόνα 39: Περιβάλλουσα IBD από θραύσματα με οδόφραγμα

2) Θραύσματα από κατάρρευση γειτονικών κατασκευών

Η δυναμική των θραυσμάτων που προέρχονται από την κατάρρευση γειτονικών κατασκευών λόγω της έκρηξης εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της κάθε περίπτωσης. Γιατί πρέπει να γίνονται επί τόπου δοκιμές και αναλύσεις κατά τον σχεδιασμό της κατασκευής εάν υφίσταται τέτοιο ενδεχόμενο.

3) Θραύσματα από τη δημιουργία κρατήρα

Αν τα υπερκείμενα του υπόγειου αποθηκευτικού χώρου δεν έχουν επαρκές ύψος ενδέχεται κατά την έκρηξη να δημιουργηθεί κρατήρας στην επιφάνεια με αποτέλεσμα κομμάτια του πετρώματος να εκτιναχθούν προς όλες τις κατευθύνσεις. Ο κίνδυνος από τα θραύσματα αυτά εξαρτάται από την ποσότητα της εκρηκτικής ύλης Q , τον λόγο $C/Q^{1/3}$ (όπου C το ύψος των υπερκειμένων), την πυκνότητα αποθήκευσης του θαλάμου γ_c , την κλίση της επιφάνειας του εδάφους και τα χαρακτηριστικά του πετρώματος.



Εικόνα 40: Ύψος υπερκειμένων και κλίση επιφάνειας εδάφους

Ο κίνδυνος από τη δημιουργία κρατήρα εξετάζεται στις περιπτώσεις που ο λόγος $C/Q^{1/3}$ είναι ίσος ή μικρότερος από $1,2 \text{ m/kg}^{1/3}$. Για μεγαλύτερες τιμές ο κίνδυνος δεν εξετάζεται. Αυτό δεν σημαίνει ότι δεν υπάρχει διαταραχή της επιφάνειας, αλλά ότι ο κρατήρας είναι αμελητέος και η εκτόξευση θραυσμάτων μάλλον απίθανη. Η απόσταση ασφαλείας IBD υπολογίζεται από τον τύπο

$$IBD = 38,7 \cdot Q^{1/3} \cdot f_{\gamma} \cdot f_c \cdot f_a$$

όπου f_{γ} παράμετρος πυκνότητας αποθήκευσης

f_c παράμετρος ύψους υπερκειμένων

f_{ar} παράμετρος κλίσης εδάφους

Οι παράμετροι f_{γ} και f_c δίνονται από τα διαγράμματα που ακολουθούν όπου φαίνονται και οι εξισώσεις υπολογισμού τους. Στην Εικόνα 43 δίνεται πίνακας με τιμές των παραμέτρων για διάφορες τιμές των Q , γ και c .

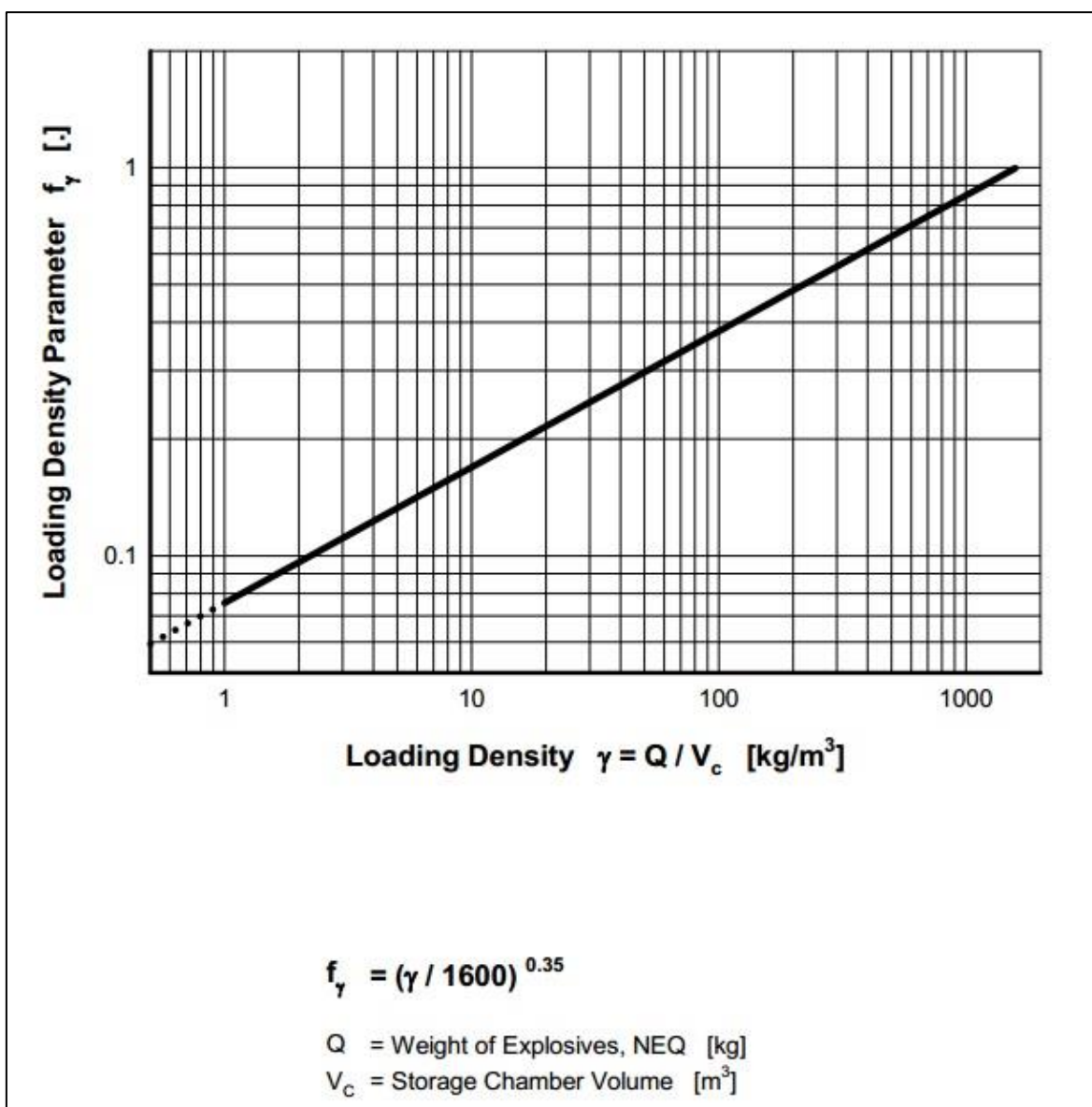
Η παράμετρος f_a λαμβάνει δύο τιμές για αύξηση f_{al} και για μείωση f_{ad} της IBD. Αρχικά υπολογίζεται η IBD_f που προκύπτει από την σχέση

$$IBD_f = 38,7 \cdot Q^{1/3} \cdot f_{\gamma} \cdot f_c$$

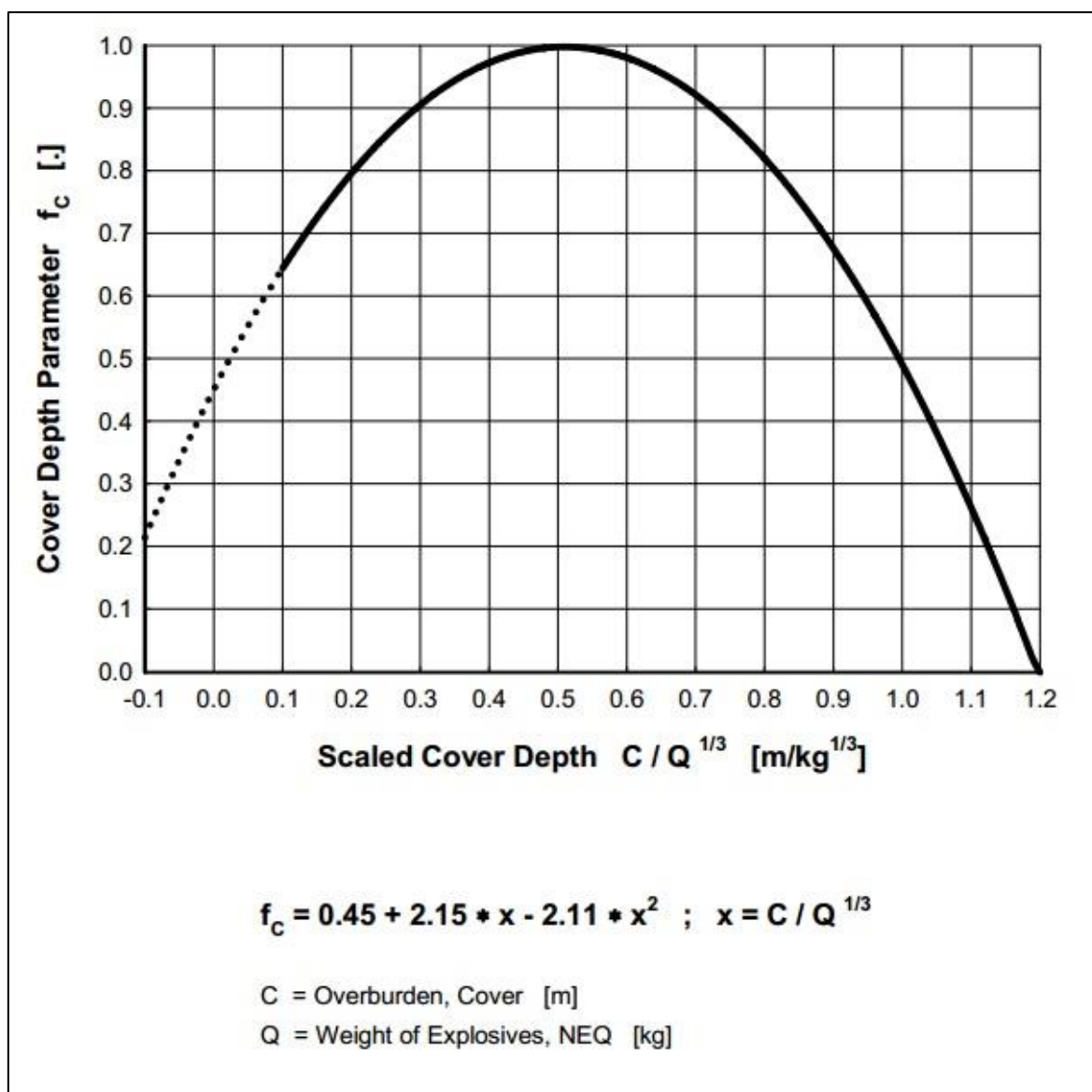
Στη συνέχεια από τα διαγράμματα της εικόνας 44 λαμβάνονται οι τιμές για τους συντελεστές απομείωσης και αύξησης f_{al} και f_{ad} . Η τελική IBD υπολογίζεται όπως φαίνεται στις εικόνες 45 και 46.

Η ανωτέρω διαδικασία υπολογισμού έχει προκύψει από την μελέτη των διαθέσιμων δεδομένων και ένα συγκριτικά μικρό αριθμό δοκιμών και ατυχημάτων. Συνεπώς η ακρίβειά της περιορίζεται βάση των κάτωθι ορίων:

- $Q = 1 - 2.000 \text{ tn}$
- $\gamma_c = 1 - 300 \text{ kg/m}^3$
- $C/Q^{1/3} > 0,1 \text{ m/kg}^{1/3}$



Εικόνα 41: Παράμετρος πικνότητας αποθήκευσης f_γ

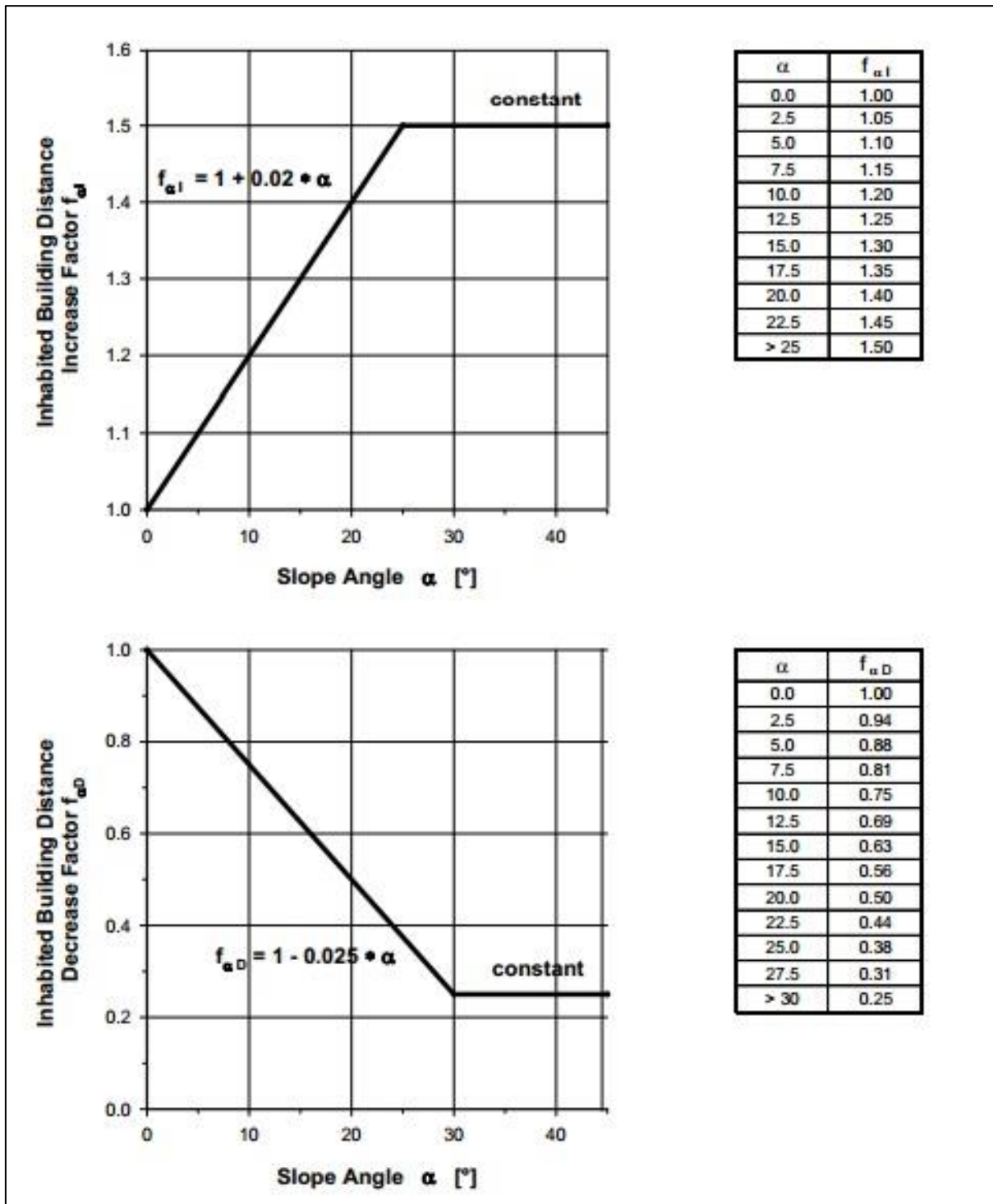


Εικόνα 42: Παράμετρος ύψους υπερκειμένων f_c

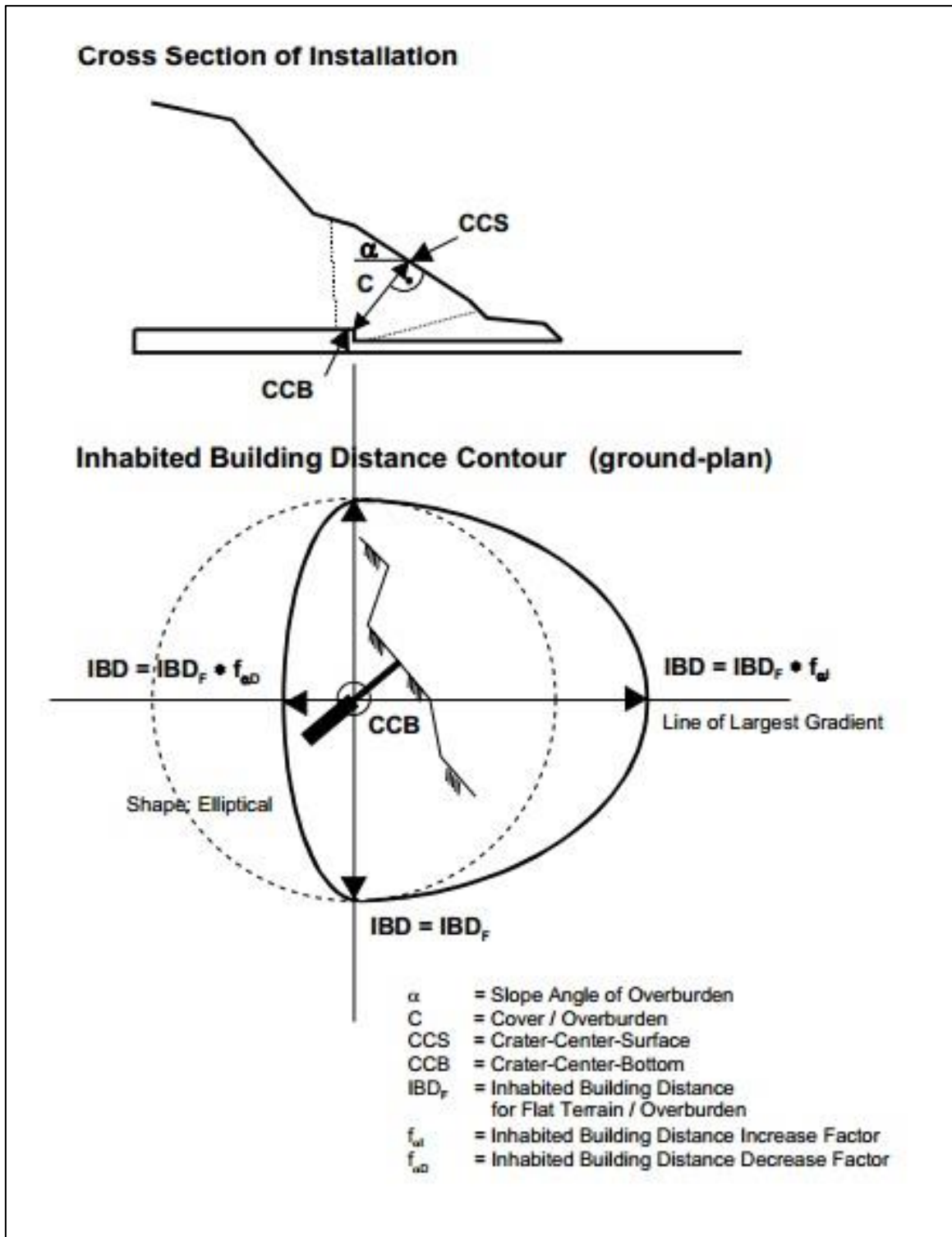
Q [kg]	Q ^{1/3} [kg ^{1/3}]	Scaled Cover Depth [m/kg ^{1/3}]	f _c [-]	Loading Density [kg/m ³]	f _γ [-]
1'000	10.0	0.10	0.64	1	0.08
1'500	11.4	0.15	0.73	3	0.11
2'000	12.6	0.20	0.80	5	0.13
2'500	13.6	0.25	0.86	10	0.17
3'000	14.4	0.30	0.91	15	0.20
4'000	15.9	0.35	0.94	20	0.22
5'000	17.1	0.40	0.97	25	0.23
6'000	18.2	0.45	0.99	30	0.25
7'000	19.1	0.50	1.00	40	0.27
8'000	20.0	0.55	0.99	50	0.30
		0.60	0.98	60	0.32
10'000	21.5	0.65	0.96	70	0.33
15'000	24.7	0.70	0.92	80	0.35
20'000	27.1	0.75	0.88	90	0.37
25'000	29.2	0.80	0.82	100	0.38
30'000	31.1	0.85	0.75	120	0.40
40'000	34.2	0.90	0.68	140	0.43
50'000	36.8	0.95	0.59	160	0.45
60'000	39.1	1.00	0.49	180	0.47
70'000	41.2	1.05	0.38	200	0.48
80'000	43.1	1.10	0.26	220	0.50
		1.15	0.13	250	0.52
100'000	46.4	1.20	0.00	300	0.56
150'000	53.1				
200'000	58.5				
250'000	63.0				
300'000	66.9				
400'000	73.7				
500'000	79.4				
600'000	84.3				
700'000	88.8				
800'000	92.8				
1'000'000	100.0				
1'500'000	114.5				
2'000'000	126.0				

Q = Weight of Explosives, NEQ

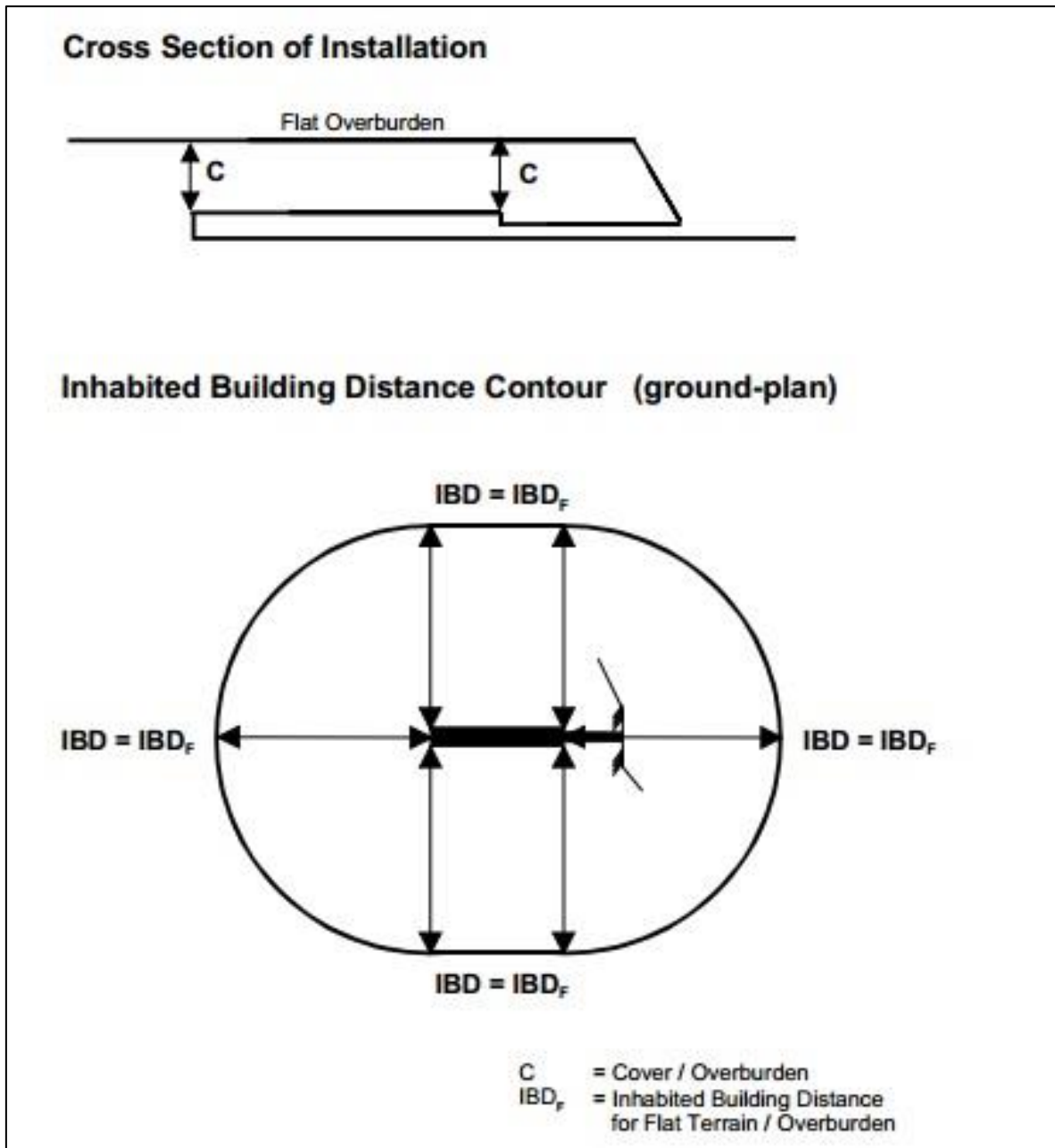
Εικόνα 43: Πίνακες τιμών παραμέτρων f_γ και f_c.



Εικόνα 44: Συντελεστές απομείωσης και αύξησης f_{ai} και f_{ad}



Εικόνα 45: Μορφή IBDγια κίνδυνο από θραύσματα κρατήρα



Εικόνα 46: Μορφή IBD για κίνδυνο από θραύσματα κρατήρα

4.5.6.3. Υπολογισμός IBD για τους κινδύνους από τις εδαφικές δονήσεις

Για την πρόβλεψη των εδαφικών δονήσεων και την παραγωγή των αποστάσεων ασφαλείας αυτού απαιτείται προσεκτική εξέταση όλων των παραγόντων που επηρεάζουν τη διάδοσή του και ανάλυση των σχετικών παραμέτρων του. Οι εδαφικές δονήσεις εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τα επί τόπου χαρακτηριστικά, επηρεάζονται δε από τους κάτωθι παράγοντες:

- α. Γεωλογική δομή και ιδιότητες των βραχωδών μαζών.
- β. Μάζα των εκρηκτικών υλών των πυρομαχικών.
- γ. Πυκνότητα αποθήκευσης του θαλάμου.
- δ. Κατανομή φορτίου και όγκος θαλάμου.

Η γεωλογική ταξινόμηση που παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη των περαμάτων των εδαφικών δονήσεων. Στην περίπτωση που ο τύπος του βραχώδους σχηματισμού δεν είναι δυνατόν να καθοριστεί με ακρίβεια, η ταξινόμηση πρέπει βασιστεί σε μεγαλύτερο βαθμό στις ιδιότητες του κύματος μετάδοσης του φαινομένου, παρά στις μηχανικές ιδιότητες του βράχου (αντοχή κτλ). Οι κύριες ιδιότητες που χαρακτηρίζουν τις βραχώδεις μάζες μπορούν να επηρεάσουν τη μετάδοση του κύματος όπως η πυκνότητα, η ταχύτητα του σεισμικού κύματος, καθώς επίσης οι ασυνέχειες και ο προσανατολισμός αυτών.

Η γεωλογία της τοποθεσίας είναι περαιτέρω κατηγοριοποιημένη στις παρακάτω κατηγορίες:

Single medium: η ενδεχόμενη τοποθεσία της έκρηξης βρίσκεται στην ίδια βραχώδη μάζα με την υπό εξέταση εκτεθειμένη στην έκρηξη κατασκευή / περιοχή.

Mixed media: όπου πάνω από το βραχώδες υπόστρωμα υπάρχουν εδαφικές προσχώσεις σημαντικού πάχους (τυπική αναλογία πάχους εδαφικού στρώματος προς βραχώδους 0,2), το οποίο επηρεάζει τη μετάδοση του εδαφικού κραδασμού και τη συχνότητα του κύματος. Στην κατηγορία αυτή η ενδεχόμενη τοποθεσία της έκρηξης βρίσκεται επί του βραχώδους στρώματος, όπου βρίσκονται και οι θάλαμοι αποθήκευσης, ενώ υπό εξέταση εκτεθειμένη κατασκευή βρίσκεται επί του εδάφους. Σε περιπτώσεις όπου η κάλυψη του εδάφους είναι μικρότερη του

0,05 της απόστασης μετάδοσης (απόσταση μεταξύ θαλάμου έκρηξης και επιφανειακής κατασκευής) ή μικρότερη των 5m η γεωλογία της τοποθεσίας μπορεί να υπαχθεί στην κατηγορία Single medium.

Typical Rock Type Rock Mass Quality	Gabbro, Gneiss, Granite, Norite, Andesite, Dolerite, Diabase, Rhyolite, Quartzite, Dolomite, Marble, Limestone*, Sandstone*	Mudstone, Siltstone, Shale, Slate, Limestone*, Sandstone*	Tuff, Chalk, Rock Salt, Coal, Limestone*, Sandstone*
Good to Very good quality rock mass with few sets of unweathered or slightly weathered discontinuity sets Q > 10 RMR > 65 RQD > 75% V _p > 4500 m/s	Good	Fair	Poor
Fair to good quality rock mass with several sets of moderately weathered discontinuities 1 < Q < 10 50 < RMR < 65 50% < RQD < 75% 3500 < V _p < 4500 m/s	Fair	Fair	Poor
Poor quality rock mass with numerous weathered joints Q < 1 RMR < 50 RQD < 50% V _p < 3500 m/s	Poor	Poor	Poor

where
RMR = Rock Mass Rating
RQD = Rock Quality Designation
Q = Rock Quality Index

Εικόνα 47: Πίνακας γεωλογικής ταξινόμησης

Για την αξιολόγηση της δομικής απόκρισης των κατασκευών οι πιο σημαντικοί παράμετροι των εδαφικών δονήσεων είναι το μέγεθος και η συχνότητα. Το μέγεθος εκφράζεται με τη μέγιστη ταχύτητα σωματιδίου (Peak Particle Velocity - PPV) ενώ η συχνότητα μπορεί να αναπαρασταθεί από την κύρια συχνότητα (Principal Frequency - PF). Αν είναι εφικτό οι υπολογισμοί πρέπει να γίνουν τόσο για την κάθετη όσο και για την οριζόντια συνιστώσα του κύματος.

Η PPV και η PF περιγράφονται από τις κατωτέρω εξισώσεις:

$$PPV = A \left(\frac{R}{Q^{1/3}} \right)^{-m}$$

$$PF = B \left(\frac{R}{Q^{1/3}} \right)^{-n}$$

όπου PPV (m/s) και PF (Hz)

R = ακτινική απόσταση μετρούμενη από την παρειά της αίθουσας κατά μήκος ευθείας από το κέντρο της αίθουσας έως το σημείο ενδιαφέροντος στην επιφάνεια του εδάφους (m)

Q = Ποσότητα εκρηκτικών (καθαρό βάρος) (kg)

A, B, συντελεστές

$R/Q^{1/3} = 1.0 \text{ m/kg}^{1/3}$ και

m, n είναι συντελεστές εξασθένισης

Στους παρακάτω πίνακες δίνονται τιμές για του συντελεστές A, B και m, n για τον υπολογισμό των PPV και PF, ανάλογα με την γεωλογική ταξινόμηση και την πυκνότητα αποθήκευσης στον θάλαμο. Τα αποτελέσματα καλύπτουν φορτία έως 500 τόνους, αίθουσες μήκους που κυμαίνεται από 45m έως 120m με μέγιστο όγκο 50.000m³ και αναλογία ανοίγματος προς μήκος μεταξύ 1:2 και 1:4. Οι πυκνότητες φορτίσεων που έχουν ληφθεί φτάνουν έως τα 50kg/m³ με βραχώδη κάλυψη ή ισοδύναμα κάλυψη περίπου $1,0 \cdot Q^{1/3} \text{ m}$.

A. For PPV in Single Medium Geology

A.1 Chamber with width-to-length ratio of 1:2

Geology	Loading Density, kg/m ³				m
	5	10	20	50	
	A				
Good Rock	0.79	1.08	1.35	1.52	1.23
Fair Rock	1.00	1.19	1.40	1.62	1.56
Poor Rock	1.00	1.30	1.55	1.82	1.90

A.2 Chamber with width-to-length ratio of 1:4

Geology	Loading Density, kg/m ³				m
	5	10	20	50	
	A				
Good Rock	0.56	0.75	1.08	1.20	1.23
Fair Rock	0.78	1.00	1.23	1.49	1.56
Poor Rock	0.78	1.01	1.39	1.64	1.90

B. For PPV in Mixed-Media Geology

B.1 Chamber with width-to-length ratio of 1:2

Geology	Loading Density, kg/m ³				m
	5	10	20	50	
	A				
Good Rock	1.14	1.38	1.54	1.77	1.71
Fair Rock	1.41	1.69	2.01	2.37	2.01
Poor Rock	1.89	2.32	2.60	2.96	2.34

B.2 Chamber with width-to-length ratio of 1:4

Geology	Loading Density, kg/m ³				m
	5	10	20	50	
	A				
Good Rock	1.08	1.29	1.45	1.70	1.71
Fair Rock	1.20	1.62	1.85	2.13	2.01
Poor Rock	1.78	2.10	2.47	2.77	2.34

Note:

$$\text{Peak Particle Velocity, PPV} = A (R/Q^{1/3})^{-m}$$

Εικόνα 48: Τιμές συντελεστών A και m

Geology and Chamber Geometry	Loading Density, kg/m ³				
	5	10	20	50	n
	B, Hz				
Single Medium Geology					
Chamber with width-to-length ratio of 1:2	85	76	72	65	0.84
Chamber with width-to-length ratio of 1:4	96	86	79	73	
Mixed Media Geology					
	Loading Density, kg/m ³				
	5	10	20	50	n
	B, Hz				
Chamber with width-to-length ratio between 1:2 and 1:4	64	61	51	45	0.67

Note:
Principal Frequency, $PF = B (R/Q^{1/3})^{-n}$

Damage	Damage Index	Description of Damage – High Frequency Response	State of Building
Minor	< 0.4	Small cracks in concrete. Reinforcement still in elastic state. Overall stiffness reduction by about 20-40%.	Easily repairable
Moderate	0.4 – 0.6	Many small cracks occur along structural members. Overall stiffness reduction by about 40-60%	Repairable
Severe	0.6 – 0.9	Many large cracks, some areas with plastic hinge formation, reinforcement yields. Overall stiffness reduction by 60-100%.	Non-repairable
Collapse	> 0.9	Collapse. Complete loss of stiffness.	Loss of building

Εικόνα 49: Τιμές συντελεστών B και n

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι κατηγορίες ζημιών των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα βάση ενός συντελεστή ζημιών (Damage Index – DI), που αντιπροσωπεύει τη μείωση της συχνότητας της κατασκευής και δίνεται από τον τύπο

$$DI = 1 - f_i^2 / f_p^2$$

όπου f_i η αρχική συχνότητα και f_p η συχνότητα μετά τις εδαφικές δονήσεις από την έκρηξη.

Damage	Damage Index	Description of Damage – High Frequency Response	State of Building
Minor	< 0.4	Small cracks in concrete. Reinforcement still in elastic state. Overall stiffness reduction by about 20-40%.	Easily repairable
Moderate	0.4 – 0.6	Many small cracks occur along structural members. Overall stiffness reduction by about 40-60%	Repairable
Severe	0.6 – 0.9	Many large cracks, some areas with plastic hinge formation, reinforcement yields. Overall stiffness reduction by 60-100%.	Non-repairable
Collapse	> 0.9	Collapse. Complete loss of stiffness.	Loss of building

Εικόνα 50: Κατηγορίες ζημιών κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα

Η απόσταση ασφαλείας IBD από τις εδαφικές δονήσεις υπολογίζεται ως η απόσταση που οι κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα έχουν δείκτη ζημιών $DI < 0,4$ και δίνεται από τους κατωτέρω τύπου ανάλογα με το εύρος της κύριας συχνότητας PF:

$$IBD = \left(\frac{0,4}{A} \right)^{\frac{1}{m}} \cdot Q^{\frac{1}{3}} \quad 10\text{Hz} \leq PF \leq 30\text{Hz}$$

$$IBD = \left(\frac{0,0825 \cdot B^{0,46}}{A} \right)^{\frac{1}{(-m+0,46n)}} \cdot Q^{\frac{1}{3}} \quad 30\text{Hz} < PF \leq 100\text{Hz}$$

$$IBD = \left(\frac{0,7}{A} \right)^{\frac{1}{m}} \cdot Q^{\frac{1}{3}} \quad 100\text{Hz} < PF$$

Αρχικά υπολογίζουμε την IBD με την πρώτη εξίσωση και στην συνέχεια ελέγχουμε αν η τιμή της PF είναι μέσα στο αντίστοιχο εύρος. Αν δεν είναι χρησιμοποιούμε την επόμενη εξίσωση για την IBD κ.ο.κ. Σημειώνεται ότι η PF υπολογίζεται από τον τύπο που δόθηκε παραπάνω αλλά ως απόσταση R χρησιμοποιούμε την απόσταση IBD.

Η ανωτέρω διαδικασία υπολογισμού ισχύει για τα εξής όρια πέραν των οποίων δεν υφίστανται πειραματικά δεδομένα ή δεδομένα από ατυχήματα και πρέπει να γίνονται επί τόπου δοκιμές και αναλύσεις:

- $Q = 1 - 500 \text{ tn}$
- $V_c < 50.000 \text{ m}^3$
- $\gamma_c = 1 - 50 \text{ kg/m}^3$
- $C/Q^{1/3} \approx 1 \cdot Q^{1/3}$
- Μήκος θαλάμου: 45 – 120m
- Λόγος πλάτους προς μήκος θαλάμου: 1:2 – 1:4

4.5.7. Απόσταση Δημόσιων Οδών Κυκλοφορίας (PTRD)

Η απόσταση που πρέπει να απέχουν οι οδοί κυκλοφορίας από τον υπόγειο χώρο αποθήκευσης πυρομαχικών υπολογίζεται βάση των αποστάσεων κατοικήσιμων κατασκευών που αναλύθηκαν παραπάνω για τα διάφορα είδη κινδύνου.

α) Για αέριο ωστικό κύμα χρησιμοποιείται η ίδια μεθοδολογία με την IBD και η εξίσωση

$$PTRD = 1,64 \cdot d_{te} \cdot \left[\frac{P_e}{9,0} \right]^{0,72}$$

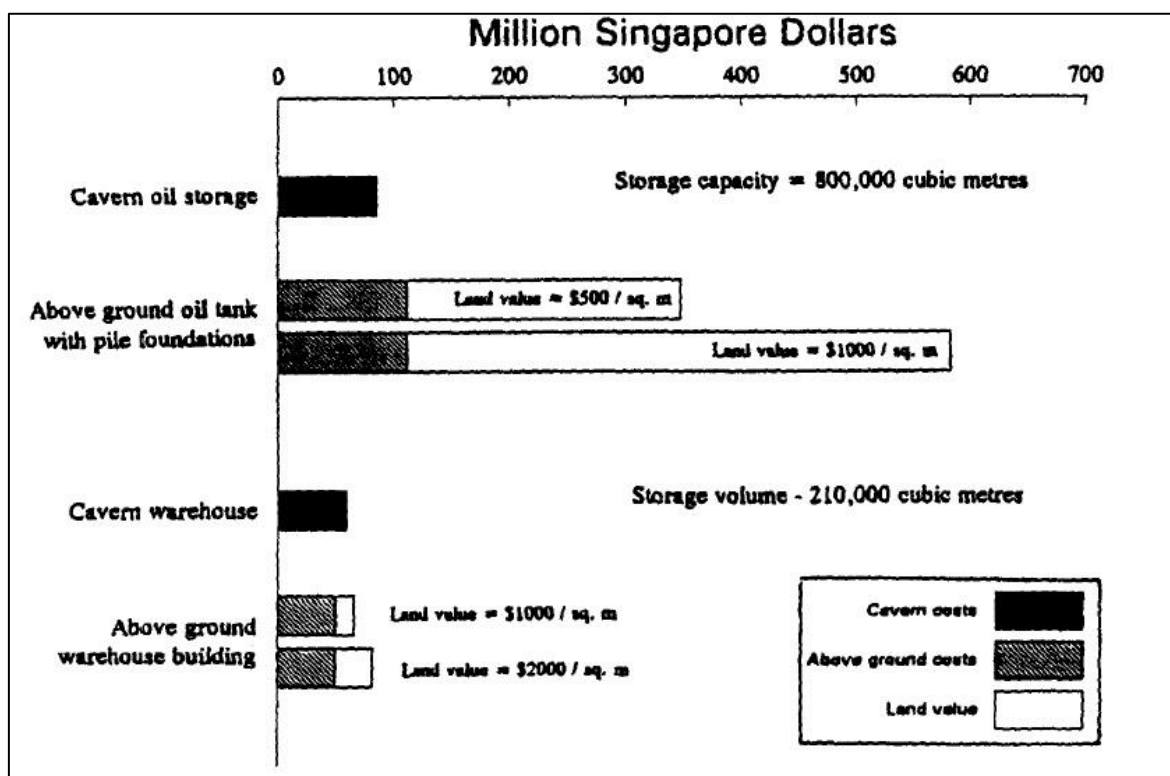
β) Για θραύσματα ισχύει $PTRD=2/3 \text{ IBD}$

γ) Για εδαφικές δονήσεις ισχύει $PTRD=2/3 \text{ IBD}$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

5. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΧΩΡΟΥ ΠΥΡΟΜΑΧΙΚΩΝ ΓΙΑ ΤΙΣ ΑΝΑΓΚΕΣ ΤΩΝ ΕΝΟΠΛΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ

Η αποθήκευση των πυρομαχικών των ελληνικών Ενόπλων Δυνάμεων υπόγεια προσφέρει, όπως είδαμε, πολλά πλεονεκτήματα όπως προστασία, απόκρυψη δραστηριοτήτων και ακριβούς τοποθεσίας, ασφάλεια, φύλαξη, έλεγχος επιπτώσεων ατυχήματος κ.α. Το κύριο μειονέκτημα είναι το κόστος κατασκευής. Ωστόσο αν υπολογιστούν τα κόστη λειτουργίας και συντήρησης και η διάρκεια ζωής της κάθε κατασκευής, τότε σε βάθος χρόνου οι υπόγειες εγκαταστάσεις είναι οικονομικότερες από τις αντίστοιχες υπέργειες. Ενδεικτικό είναι το κάτωθι διαγράμμα που παρουσιάζει την ανάλυση κόστους που έγινε κατά τον σχεδιασμό του Underground Ammunition Facility (UAF) που περιγράφηκε στην παρ. 3.2.[17].



Εικόνα 51: Κόστος υπέργειων και υπόγειων χώρων αποθήκευσης στη Σιγκαπούρη.

Σύμφωνα με τα (NATO Manuals 2010) περισσότερο οικονομικοί είναι θάλαμοι μήκους 100 – 200m και όγκου 5.000 – 15.000m³, οι οποίοι παρέχουν δυνατότητα αποθήκευσης 1.000 – 2.000tn πυρομαχικών, με μήκος σήραγγας πρόσβασης 50 – 100m.

Επισημαίνεται ότι οι επικρατούσες γεωλογικές συνθήκες επηρεάζουν σημαντικά το κόστος κατασκευής και συνεπώς η επιλογή της τοποθεσία είναι αρκετά κρίσιμη. Σύμφωνα με το (US Army Corps of Engineers, 1996) μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι κατωθι πίνακες ταξινόμησης του βραχώδους σχηματισμού για την επιλογή της κατάλληλης θέσης κατασκευής ενός υπόγειου χώρου αποθήκευσης πυρομαχικών, βάση των γνωστότερων συστημάτων ταξινόμησης βραχομάζας (RQD, RMR, Q) και των χαρακτηριστικών αυτής.

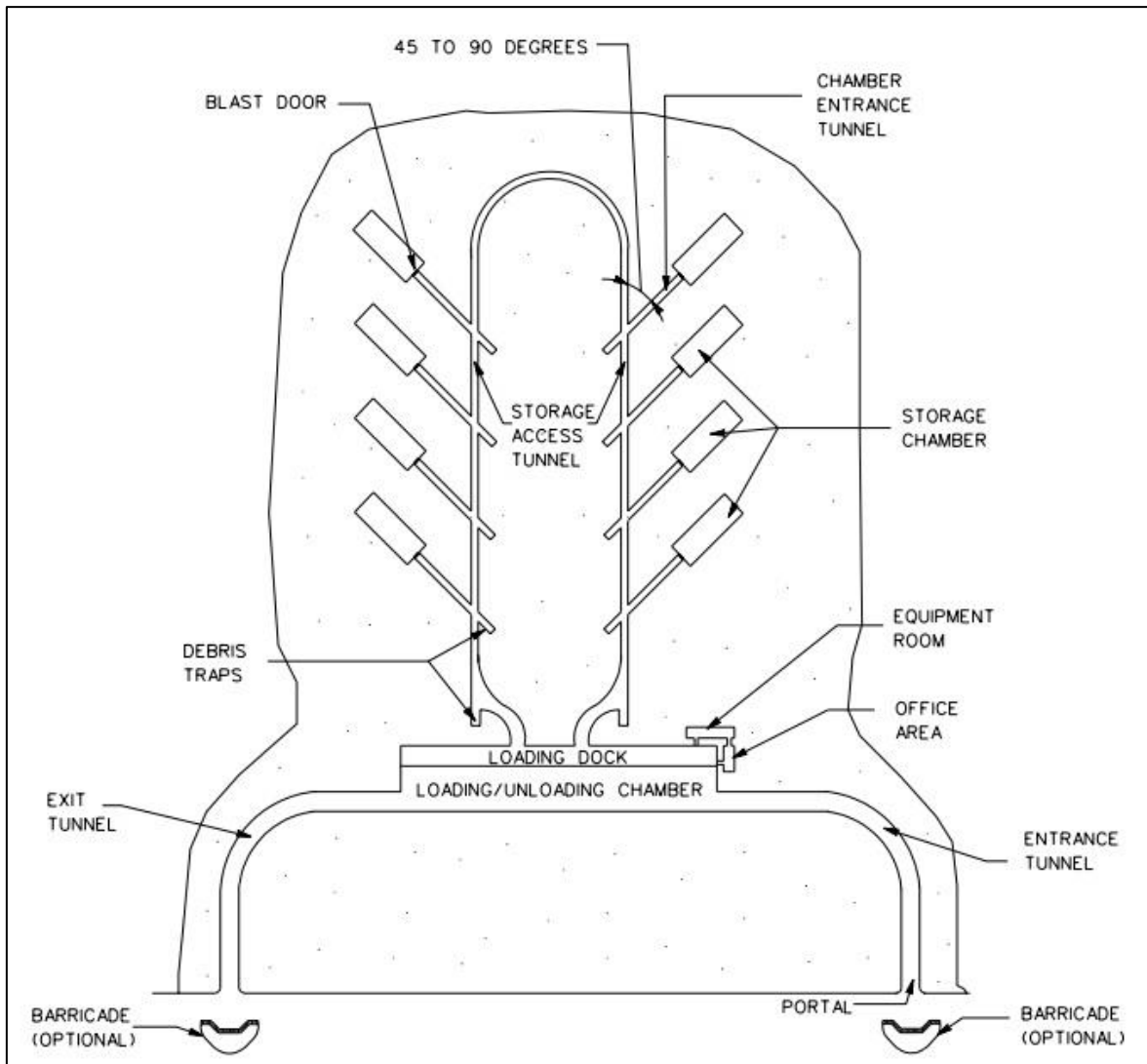
TABLE 1 CLASSIFICATION OF ROCK TYPES FOR EXPLOSIVES SAFETY SITING OF UNDERGROUND MAGAZINES			
ROCK PROPERTIES			
STRENGTH CLASS	MASS DENSITY, kg/m ³	IN-SITU SEISMIC VELOCITY, c m/sec	IMPEDANCE FACTOR $\rho \cdot c \cdot 10^{-6}$ kg/m ² -sec
WEAK	< 2250	< 3,400	< 7.50
MODERATELY STRONG	2250 - 2500	3,400 - 4,600	7.50 - 11.50
STRONG	> 2500	> 4,600	> 11.50

TABLE 2 CLASSIFICATION OF ROCK TYPES FOR DESIGN AND CONSTRUCTION OF UNDERGROUND MAGAZINES			
SYSTEM VALUES			
STRENGTH CLASS	RQD	RMR	Q
WEAK	< 50	< 40	< 5
MODERATELY STRONG	50 - 80	40 - 70	5 - 50
STRONG	> 80	> 70	> 50

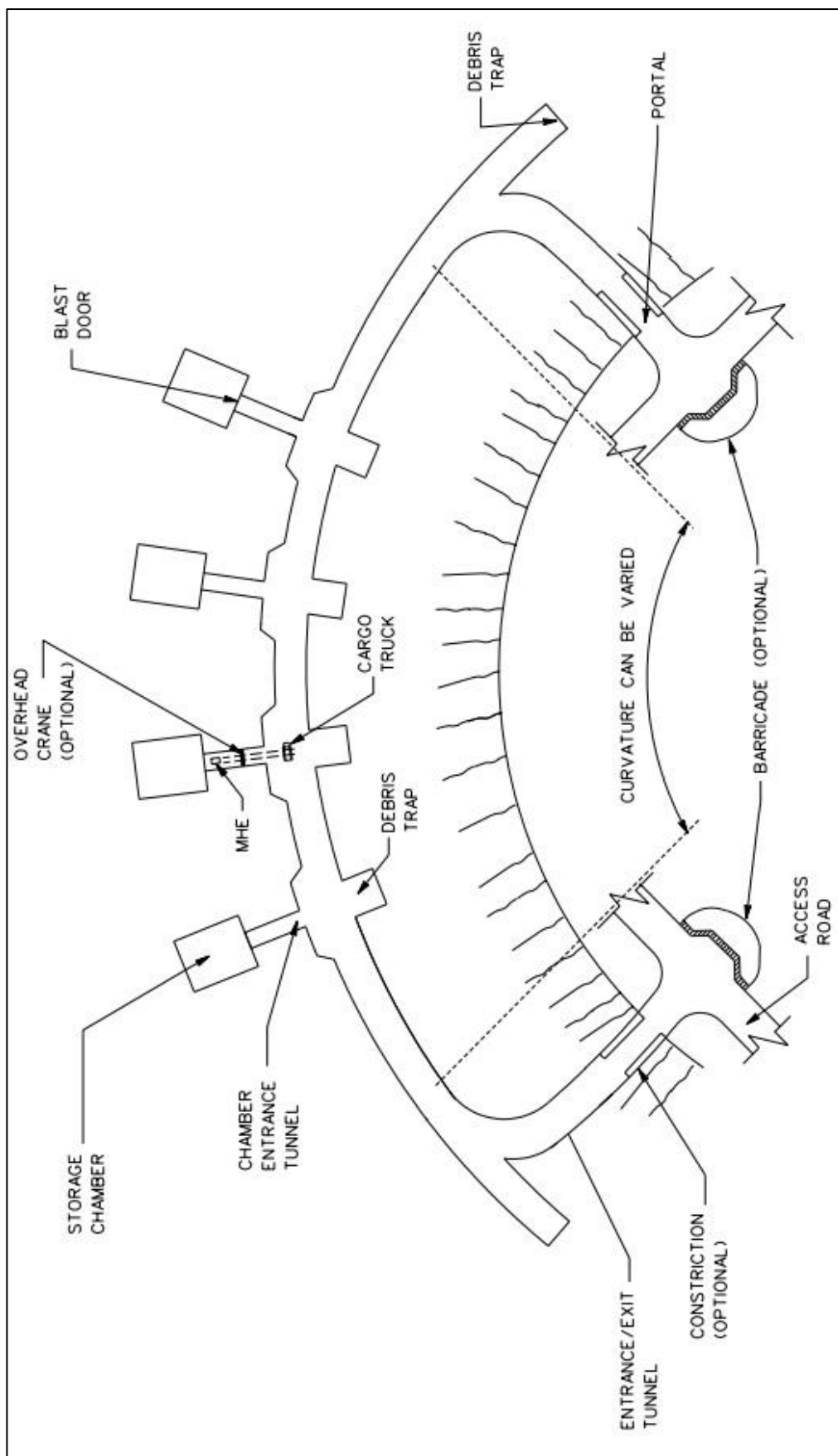
Εικόνα 52: Πίνακες ταξινόμησης βραχομάζας για κατασκευή υπόγειου χώρου αποθήκευσης πυρομαχικών

Για την επιλογή του κατάλληλου χώρου αποθήκευσης πρέπει να γνωρίζουμε τις ακριβείς ανάγκες αποθήκευσης, δηλαδή την ποσότητα κάθε πυρομαχικού που θα αποθηκευτεί, ώστε να υπολογιστεί η αντίστοιχη μάζα της εκρηκτικής ύλης Qκάθε θαλάμου και να γίνουν οι υπολογισμοί για τις αποστάσεις ασφαλείας QD.

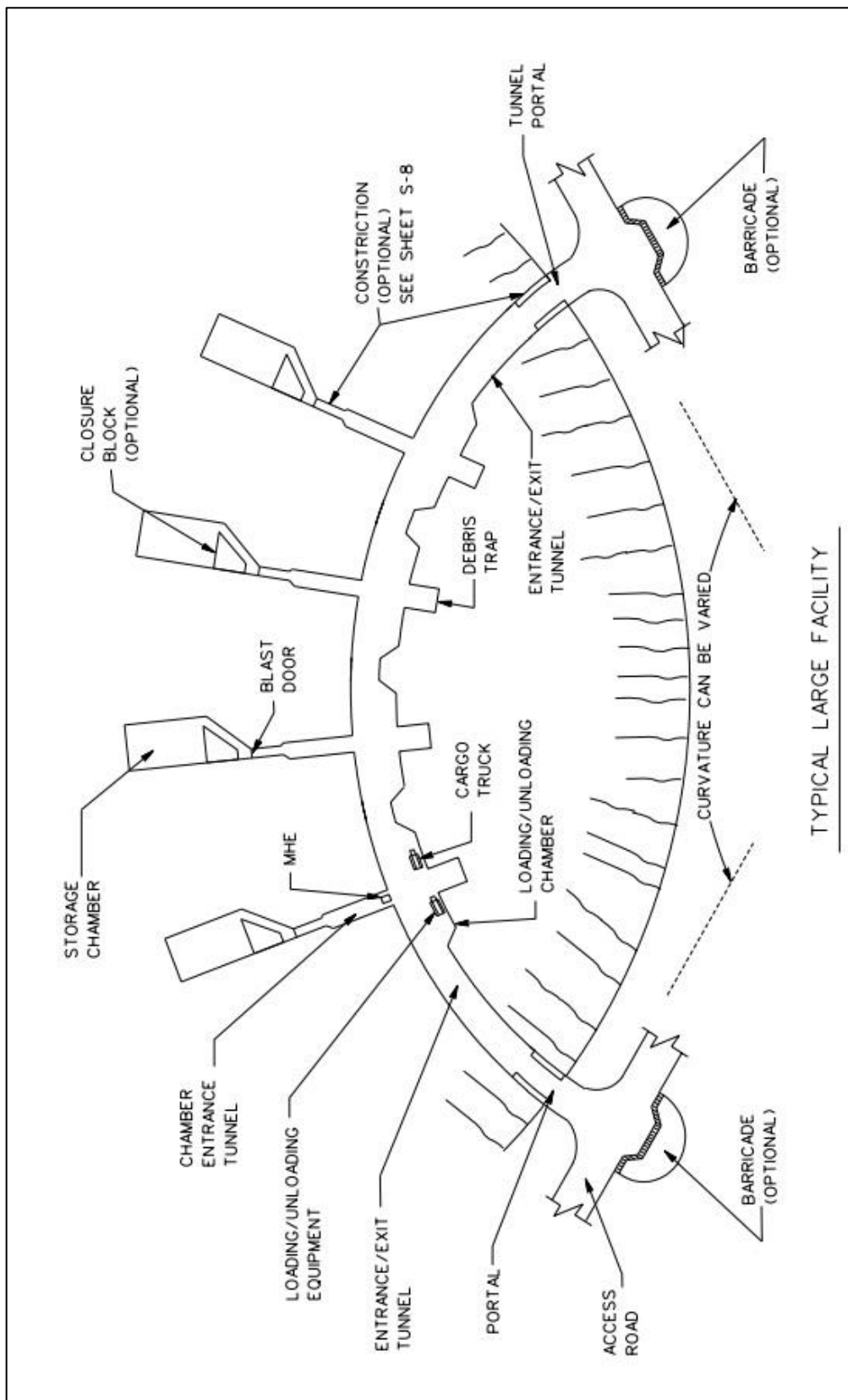
Ωστόσο έχουν σχεδιαστεί συγκεκριμένες τυπικές εγκαταστάσεις [18] οι οποίες πληρούν τα κριτήρια που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 4. Στις ακόλουθες εικόνες έχουμε τυπικές εγκαταστάσεις μεγάλης, μεσαίας και μικρής δυνατότητας αποθήκευσης και προτεινόμενες διατομές των θαλάμων αποθήκευσης και της σήραγγας κίνησης. Η σχεδίαση της μικρής εγκατάστασης προσφέρεται για την διασπορά των πυρομαχικών ώστε να μην είναι συγκεντρωμένα σε μία τοποθεσία.



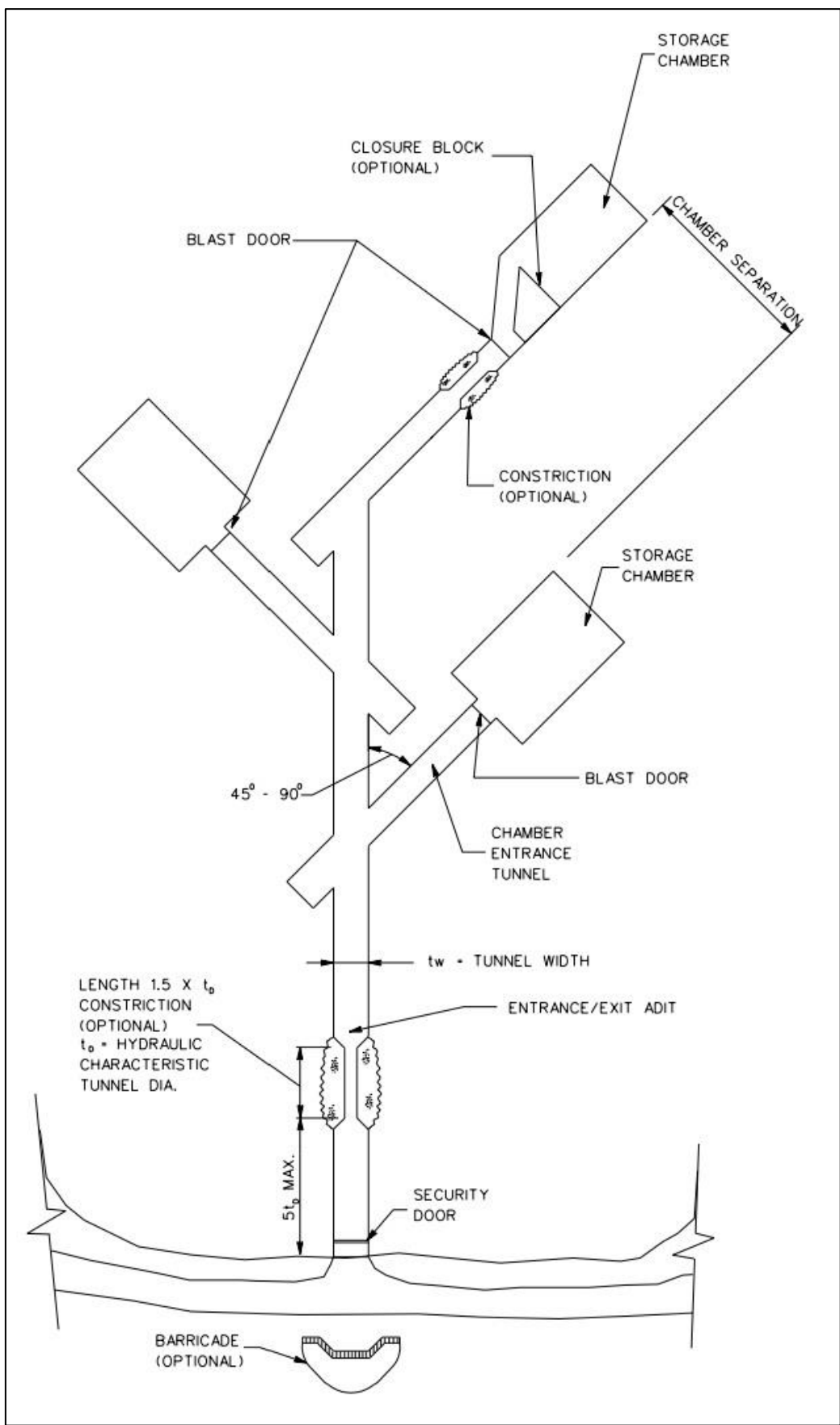
Εικόνα 53: Τυπική μεγάλη εγκατάσταση υπόγειας αποθήκευσης πυρομαχικών.



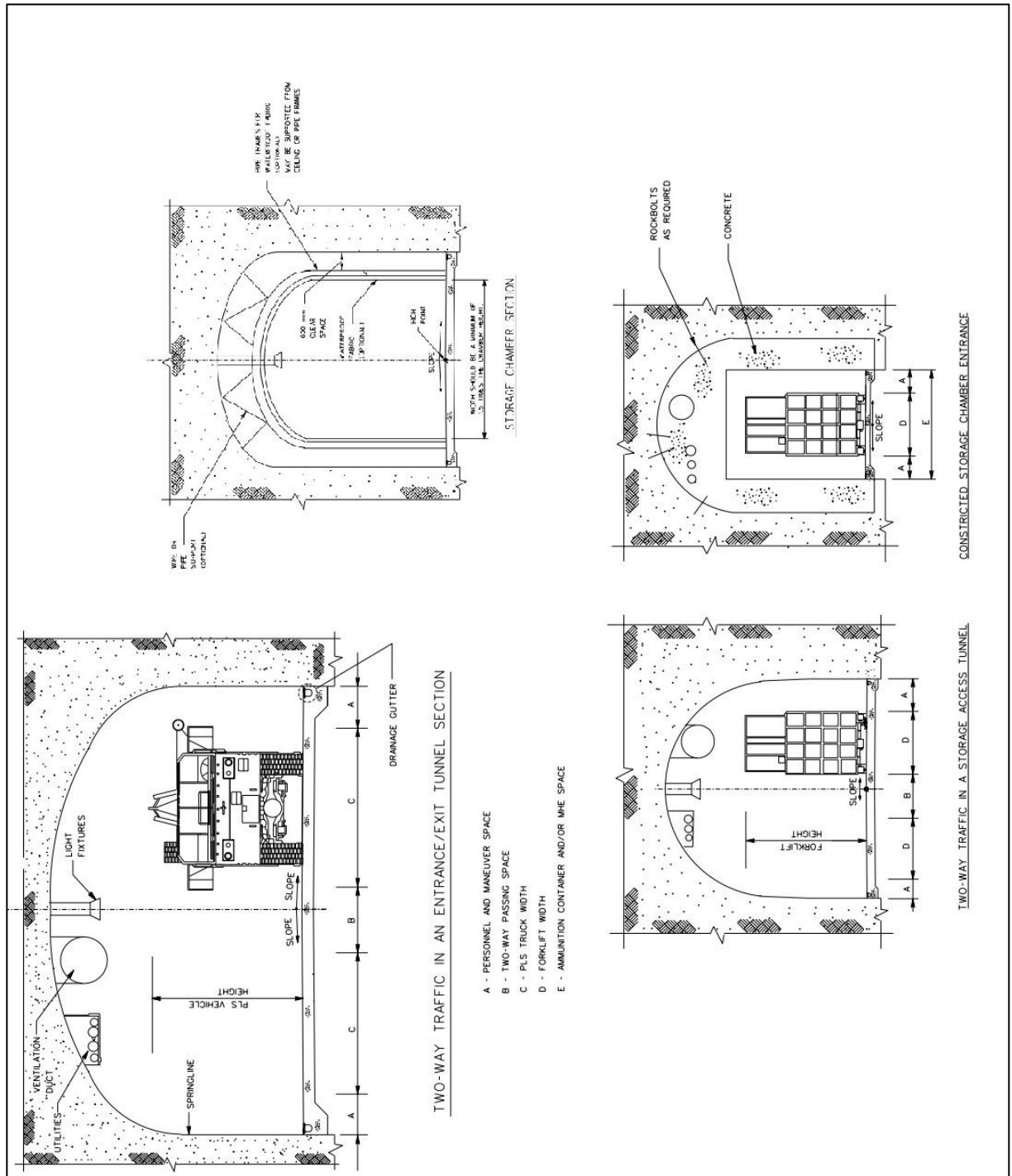
Εικόνα 55: Τυπική μεσαία εγκατάσταση υπόγειας αποθήκευσης πυρομαχικών.



Εικόνα 55: Τυπική μεσαία εγκατάσταση υπόγειας αποθήκευσης πυρομαχικών.



Εικόνα 56: Τυπική μικρή εγκατάσταση υπόγειας αποθήκευσης πυρομαχικών.



Εικόνα 57: Διατομές θαλάμου αποθήκευσης και σήραγγας κίνησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κατά τον σχεδιασμό ενός υπόγειου χώρου αποθήκευσης πυρομαχικών πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη βαρύτητα στην αποφυγή των κινδύνων από ενδεχόμενο ατύχημα / έκρηξη σε ένα θάλαμο αποθήκευσης. Ο κίνδυνος προέρχεται από τα ακόλουθα τρία αποτελέσματα της έκρηξης:

- α) Αέριο Ωστικό Κύμα
- β) Θραύσματα
- γ) Δονήσεις Εδάφους

Για τον περιορισμό του κινδύνου εντός του υπόγειου έργου λαμβάνονται τα κάτωθι μέτρα

- 1) Κατάλληλος σχεδιασμός της εγκατάστασης (τα πολύπλοκότερα σχέδια είναι προτιμότερα)
- 2) Κατάλληλη τοποθέτηση των εξόδων / ανοιγμάτων του υπόγειου χώρου
- 3) Διακλαδώσεις σηράγγων με γωνίες $45^{\circ} - 90^{\circ}$
- 4) Κατασκευή μηχανισμών κλεισίματος της εξόδου του θαλάμου κατά την έκρηξη
- 5) Κατασκευή θαλάμων αποτόνωσης των αερίων της έκρηξης
- 6) Κατασκευή στενώσεων της σήραγγας για τη μείωση του όγκου των αερίων και τη θερμότητας της έκρηξης
- 7) Κατασκευή παγίδων θραυσμάτων
- 8) Κατασκευή παγίδων έκρηξης για την εξασθένηση του αέριου ωστικού κύματος
- 9) Κατασκευή οδοφράγματος εξόδου

Επίσης, υπολογίζεται η απαιτούμενη απόσταση μεταξύ των θαλάμων ώστε να μην μεταδοθεί η έκρηξη.

Για τον περιορισμό του κινδύνου εκτός του υπόγειου έργου υπολογίζονται αποστάσεις ασφαλείας για τις κατοικήσιμες κατασκευές, τις οδούς κυκλοφορίας κ.α. με βάση την ποσότητα των εκρηκτικών υλών που ανατινάζονται (Quantity –

Distances). Η σημαντικότερη απόσταση είναι η Απόσταση Κατοικήσιμων Κατασκευών (IBD) βάσει της οποίας υπολογίζονται οι υπόλοιπες. IBD υπολογίζεται για κάθε έναν από τους ανωτέρω κινδύνους δηλ το αέριο ωστικό κύμα, τα θραύσματα και τις δονήσεις. Οι αποστάσεις αυτές είναι ακτινικές και ορίζουν περιοχές κινδύνου.

Για το σχεδιασμό μίας εγκατάστασης αποθήκευσης πυρομαχικών είναι απαραίτητη η γνώση της ποσότητας και των χαρακτηριστικών των πυρομαχικών και εκρηκτικών που θα περιέχει, ώστε να υπολογιστεί η μάζα εκρηκτικής ύλης που περιέχει κάθε θάλαμος. Ωστόσο δίνονται σχέδια τυπικών εγκαταστάσεων και διατομών σηράγγων που έχουν σχεδιαστεί ώστε να καλύπτουν τα ανωτέρω κριτήρια.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Πολύβιος, Ιστορία, Βιβλίο ΚΒ. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα <http://el.wikisource.org/wiki/>
- [2] Πολύβιος, Ιστορία, Βιβλίο ΙΣ. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα <http://el.wikisource.org/wiki/>
- [3] Ebrey, Patricia Buckley, *The Cambridge Illustrated History of China*, Cambridge: University Press, 1996.
- [4] Bearss, Edwin C. *The Campaign for Vicksburg*. 3 vols. Dayton, OH: Morningside House, 1985.
- [5] Corrigan, Jim. *The 48th Pennsylvania in the Battle of the Crater: A Regiment of Coal Miners Who Tunneled Under the Enemy*. Jefferson, NC: McFarland & Company, 2006.
- [6] Passingham, I. *Pillars of Fire: The Battle of Messines Ridge, June 1917*. Stroud: Sutton Publishing, 1998.
- [7] Ναλμπάντης, Πολυχρόνης, Υππγός ε.α. *Η θεωρία της φυσικής στην ερμηνεία του πολέμου ελιγμού*.
- [8] Lind, William S. *Maneuver Warfare Handbook*. Westview special studies in Military Affairs, 1985.
- [9] Brooms, B. B. *Singapore – a city of opportunities and challenges*. Proc. of a seminar, "Rock Cavern – Hong Kong", 131-134. Hong Kong: Institution of Mining and Metallurgy, 1989.
- [10] Lee, K. W.; Zhao, J.; Choa, V.; Tan, S. L.; and Veijayaratham, M. *Geophysical investigations for assessing the construction of underground space in the Bukit Timah granite in Singapore*. Proc. 11th Southeast Asian Geotechnical Conference, Singapore, 801-806. 1993.
- [11] Wallace, J. C.; He, C. E. and Bergh-Christensen, J. *Geotechnical feasibility of rock cavern construction in the Bukit Timah granite of Singapore*. Proc. Seminar, "Rock Caverns for Underground Space Utilization", 53-66. Singapore: Nanyang Technological University, 1993.

- [12] Zhao, J.; Hudson, J. A.; and Ho, C. E. *Assessing the rock mass quality of the Bukit Timah granite in Singapore for cavern construction*. Proc. International Symposium on Underground Openings for Public Use, Gjøvik, Norway, 14-17 June, 1994, 263-272. Oslo: Norwegian Society of Chartered Engineers. University, 1994.
- [13] Wallace, J. C.; Ho, C. E.; Bergh-Christensen, J.; Zhao, J.; Zhou, Y. X. and Choa, V. *A Proposed Warehouse – Shelter Cavern Scheme in Singapore Granite*. Tunneling and Underground Space Technology, Vol.10, No 2, 163-166. Great Britain, 1995.
- [14] NATO. STANDARDIZATION AGREEMENT (STANAG) 4123. *Determination of the classification of military ammunition and explosives*. 1995.
- [15] NATO. AASTP-1(1) - *SAFETY PRINCIPLES FOR THE STORAGE OF MILITARY AMMUNITION AND EXPLOSIVES*. 2010.
- [16] Swiss Federal Buildings Office/Engineering Division - Swiss-Klotz Design, Drawing Nos. 1036.SP.2.020/025/027
- [17] Zhao, J.; Bergh-Christensen, J. *Construction and Utilization of Rock Cavern in Singapore*. Tunneling and Underground Space Technology, Vol.11, No 1, 85-91. Great Britain, 1996.
- [18] US Army Corps of Engineers., *Definitive Drawings Underground Storage Facility (DEF 421-80-04)*. Huntsville, Alabama, 1996.
- [19] Happer, W. et al. *Characterization of Underground Facilities*. JASON, Virginia, 1999.
- [20] Sepp, Eric M. Lt Col USAF. *Deeply Buried Facilities: Implications for Military Operations*. Occasional Paper No. 14, Center for Strategy and Technology Air War College, Air University, Alabama, 2000.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

- Εικόνα 1: Ασσύριοι επιτίθονται στην πόλη Lachish (σημερινό Ισραήλ) 701π.Χ. – διακρίνεται η διάνοιξη σήραγγας για την υπονόμηση των τοιχών της πόλης.
- Εικόνα 2: Η σήραγγα που διανοίχθηκε στην πολιορκία του Petersburg (1865) κατά την διάρκεια του Αμερικάνικου Εμφύλιου Πολέμου.
- Εικόνα 3: Γεωλογική Τομή Σήραγγας που διανοίχθηκε στην μάχη της Messines (1917).
- Εικόνα 4: Ζωγραφική αναπαράσταση της διάνοιξης σηράγγων κατά τη Μάχη της Messines (1917).
- Εικόνα 5: Διάνοιξη σηράγγων στη μάχη της Messines
- Εικόνα 6: Σχηματική αναπαράσταση τομής στην γραμμή Μαζινό.
- Εικόνα 7: Υπόγεια σήραγγα στην γραμμή Μαζινό. Οι βλάβες προκλήθηκαν από δοκιμές εκρηκτικών από τις Γερμανικές δυνάμεις εντός των σηράγγων μετά την κατάληψη της Γαλλίας.
- Εικόνα 8: Το Hawthorne Army Depot (HWAD) στην Νεβάδα των Ηνωμένων Πολιτειών, η μεγαλύτερη στον κόσμο βάση αποθήκευσης πυρομαχικών.
- Εικόνα 9: Kirtland Underground Munitions Storage Complex στο Νέο Μεξικό των ΗΠΑ, η μεγαλύτερη αποθήκη πυρηνικών όπλων των Αμερικάνικων Ένοπλων Δυνάμεων.
- Εικόνα 10: Κάτοψη του υπόγειου χώρου αποθήκευσης πυρομαχικών (UAF).
- Εικόνα 11: Σχηματική τομή των θαλάμων αποθήκευσης πυρομαχικών στο UAF.
- Εικόνα 12: Τρόπος φόρτωση υλικών.
- Εικόνα 13: Το καταφύγιο προσωπικού στο UAF

Εικόνα 14: Υπόγειος χώρος αποθήκευσης πυρομαχικών ενός θαλάμου.

Εικόνα 15: Λεπτομέρεια υπόγειου χώρου αποθήκευσης πολλών θαλάμων.

Εικόνα 16: Διαμόρφωση υπόγειου χώρου αποθήκευσης πυρομαχικών πολλών θαλάμων.

Εικόνα 17: Διαμόρφωση υπόγειου χώρου αποθήκευσης πυρομαχικών πολλών θαλάμων.

Εικόνα 18: Κάθετη τομή της διάταξης Swiss-Klotz.

Εικόνα 19: Κάτοψη της διάταξης Swiss-Klotz.

Εικόνα 20: Θάλαμος αποθήκευσης με διάταξη αποτόνωσης.

Εικόνα 21: Θάλαμος αποθήκευσης χωρίς διάταξη αποτόνωσης.

Εικόνα 22: Στενώσεις

Εικόνα 22: Παγίδα θραυσμάτων (Debristrap)

Εικόνα 23: Παγίδες έκρηξης

Εικόνα 24: Κάτοψη οδοφράγματος εξόδου

Εικόνα 25: Τομή οδοφράγματος εξόδου

Εικόνα 26: Πίνακας QD για επίγειες εγκαταστάσεις.

Εικόνα 27: Σχεδιάγραμμα υπολογισμού απομείωσης πίεσης στη σήραγγα

Εικόνα 28: Διάγραμμα υπολογισμού μείωσης διάρκειας t στη σήραγγα

Εικόνα 29: Υπολογισμός αλλαγών σε πίεση και διάρκεια κατά τη διακλάδωση σήραγγας.

Εικόνα 30: Διάγραμμα υπολογισμού λόγου p_2/p_1 σε στενώσεις και θαλάμους αποτόνωσης.

Εικόνα 31: Διάγραμμα υπολογισμού λόγου p_2/p_1 στις αλλαγές διατομή της σήραγγας.

Εικόνα 32: Διάγραμμα υπολογισμού λόγου ρ_2/ρ_1 στις αλλαγές διατομή της σήραγγας.

Εικόνα 33: Περιβάλλουσα IBD από θραύσματα

Εικόνα 34: Διάγραμμα $f_p - I_a/d_a$

Εικόνα 35: Διάγραμμα $\sigma - I_a/d_a$

Εικόνα 36: Τρόποι υπολογισμού του λόγου I_a/d_a

Εικόνα 37: Πίνακας τιμών για τα A, B, f_p και σ

Εικόνα 38: Βοηθητικός πίνακας τιμών για τις εξισώσεις των α και R_S

Εικόνα 39: Περιβάλλουσα IBD από θραύσματα με οδόφραγμα

Εικόνα 40: Ύψος υπερκειμένων και κλίση επιφάνειας εδάφους

Εικόνα 41: Παράμετρος πυκνότητας αποθήκευσης f_γ

Εικόνα 42: Παράμετρος ύψους υπερκειμένων f_c

Εικόνα 43: Πίνακες τιμών παραμέτρων f_γ και f_c .

Εικόνα 44: Συντελεστές απομείωσης και αύξησης f_{ai} και f_{ad}

Εικόνα 45: Μορφή IBD για κίνδυνο από θραύσματα κρατήρα

Εικόνα 46: Μορφή IBD για κίνδυνο από θραύσματα κρατήρα

Εικόνα 47: Πίνακας γεωλογικής ταξινόμησης

Εικόνα 48: Τιμές συντελεστών A και m

Εικόνα 49: Τιμές συντελεστών B και n

Εικόνα 50: Κατηγορίες ζημιών κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα

Εικόνα 51: Κόστος υπέργειων και υπόγειων χώρων αποθήκευσης στη Σιγκαπούρη.

Εικόνα 52: Πίνακες ταξινόμησης βραχομάζας για κατασκευή υπόγειου χώρου απόθηκευσης πυρομαχικών

Εικόνα 53: Τυπική μεγάλη εγκατάσταση υπόγειας αποθήκευσης πυρομαχικών.

Εικόνα 54: Τυπική μεσαία εγκατάσταση υπόγειας αποθήκευσης πυρομαχικών.

Εικόνα 55: Τυπική μεσαία εγκατάσταση υπόγειας αποθήκευσης πυρομαχικών.

Εικόνα 56: Τυπική μικρή εγκατάσταση υπόγειας αποθήκευσης πυρομαχικών.

Εικόνα 57: Διατομές θαλάμου αποθήκευσης και σήραγγας κίνησης.