



Πολυτεχνείο Κρήτης
Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων

Εφαρμογή της μεθόδου ανεστραμμένου κρατήρα
(VCR) για την ανάκτηση στύλων υποστήριξης
μεθόδου με λιθογομούμενα μέτωπα



Διπλωματική Εργασία

Τζάρας Βασίλειος

AM 2018020075

Εξεταστική Επιτροπή:

Ξηρουδάκης Γεώργιος, Επίκουρος Καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης (επιβλέπων)

Δρ. Μπαράκος Γεώργιος, Λέκτορας Curtin's University, Australia.

Δρ. Σαράτσης Γεώργιος, Ε.ΔΙ.Π. Πολυτεχνείου Κρήτης

Χανιά, Ελλάδα

Φεβρουάριος, 2024

Αφιερώνεται στην μικρότερη
αδελφή μου, Μυρτώ.

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον. Η έγκριση της παρούσας διπλωματικής εργασίας από το Πολυτεχνείο Κρήτης, δεν σημαίνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Νόμος 5343/1932, άρθρο 202)

"Sometimes you win, Sometimes you learn."

John Maxwell

Ευχαριστίες

Με την συγγραφή της διπλωματικής αυτής εργασίας, η εμπειρία μου ως προπτυχιακός φοιτητής στην σχολή ΜΗΧ.Ο.Π. του Πολυτεχνείου Κρήτης έφτασε στο τέλος της. Μια πενταετία γεμάτη ευχάριστες εμπειρίες, με παρέες, ταξίδια, διάβασμα και κάποιες πρωτόγνωρες όπως η καραντίνα κατά την διάρκεια της πανδημίας COVID-19. Είμαι ευγνώμων στους γονείς μου που με μεγάλη χαρά, μου προσέφεραν την ευκαιρία να γνωρίσω την φοιτητική ζωή και να αποκτήσω γνώσεις και αναμνήσεις που θα με συνοδεύουν στο υπόλοιπο της πορείας μου.

Επιθυμώ σε αυτό το σημείο να ευχαριστήσω τους δασκάλους μου και τα πρόσωπα που συνέβαλαν στο εγχείρημα της διπλωματικής εργασίας. Ευχαριστώ πρώτα τον καθηγητή μου κ. Ξηρουδάκη Γεώργιο, ο οποίος δέχτηκε να επιβλέψει την διπλωματική μου εργασία και με υποστήριξε σε όλη την διάρκεια εκπόνησης της. Οφείλω επίσης ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Δρ. Σαράτση Γεώργιο, ο οποίος με εφοδίασε με αμέτρητες συμβουλές και απόψεις του επί του θέματος της εργασίας και μου υπέδειξε υπομονετικά πολλές διορθώσεις/τροποποιήσεις ώστε να καταφέρω να αποδώσω στην διπλωματική εργασία ένα άρτιο κατά δύναμιν τεχνικό σχέδιο. Ευχαριστώ επίσης τον καθηγητή κ. Μπαράκο Γεώργιο ο οποίος δέχτηκε να συμμετάσχει στην εξεταστική επιτροπή και να προσφέρει την βοήθεια του καθώς και τον καθηγητή κ. Εξαδάκτυλο Γεώργιο ο οποίος δέχτηκε να παρατηρήσει τα τεχνικά σχέδια και να με συμβουλέψει κατάλληλα. Τέλος, ευχαριστώ τους συμφοιτητές μου και φίλους που στάθηκαν στο πλευρό μου κατά την διάρκεια των σπουδών μου και μου προσέφεραν ευχάριστες στιγμές.

Αφιερώνω αυτή τη διπλωματική εργασία στην μικρότερη αδελφή μου Μυρτώ, η οποία βρίσκεται όχι μακριά από την εισαγωγή στην τριτοβάθμια εκπαίδευση και καταβάλλει σημαντικές προσπάθειες για να σπουδάσει χημικός μηχανικός. Την ευχαριστώ για όλα καθώς μου συμπαραστάθηκε σε κάθε ευχάριστη και μη στιγμή και εύχομαι από καρδιάς να επιτύχει κάθε στόχο της αρέσκειας της, καθώς και να γνωρίσει τις ευχάριστες και ανεκτίμητες φοιτητικές στιγμές που και εγώ βίωσα.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία μελετά την εφαρμογή της μεθόδου ανεστραμμένου κρατήρα (VCR) για την ανάκτηση στύλων υποστήριξης μιας μεθόδου με λιθογομούμενα μέτωπα. Πρόκειται για μια νέα μέθοδο υπόγειων εκμεταλλεύσεων η οποία βασίζεται στην θεωρία κρατήρα του μηχανικού C.W. Livingston. Η μέθοδος με αρχικές δοκιμές παρουσίασε καλά αποτελέσματα και κέρδισε την εμπιστοσύνη πολλών μεταλλείων για εκτεταμένη εφαρμογή σε στύλους προστασίας, ακόμα και για καθολική εφαρμογή ως αυτόνομη μέθοδος εκμετάλλευσης.

Στην διπλωματική αρχικά παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο της μεθόδου VCR. Μετέπειτα παρουσιάζονται αναλυτικά τα σχέδια για την ανάπτυξη των μεθόδων καθώς και του τρόπου λειτουργίας τους. Τα σχέδια περιλαμβάνουν μια συνδυαστική εκμετάλλευση με την χρήση της μεθόδου Drift n' Fill για την δημιουργία των στύλων προστασίας και την εφαρμογή της μεθόδου VCR για την ανάκτηση τους. Επιπλέον, παρουσιάζεται ένας δεύτερος σχεδιασμός εκμετάλλευσης με την χρήση της μεθόδου VCR ως αυτόνομη μέθοδο εκμετάλλευσης. Τα σχέδια έγιναν με το λογισμικό AutoCAD Civil 3D και το κοίτασμα στο οποίο εκπονήθηκαν είναι πραγματική περίπτωση ευρισκόμενη στην Αυστραλία με το όνομα Kulthor. Τα σχέδια διαδέχεται η ανάλυση των δεδομένων που προκύπτουν από αυτά όπως οι όγκοι των έργων που κατασκευάστηκαν και υπολογίζεται η σχεδιαστική αραίωση και η σχέση έργων προπαρασκευής με τα έργα εκμετάλλευσης σε κάθε περίπτωση. Ταυτόχρονα πραγματοποιείται μια σύγκριση μεταξύ της συνδυαστικής εκμετάλλευσης και της αυτόνομης μεθόδου VCR ώστε να εξεταστεί η δυνατότητα της μεθόδου VCR να ανταγωνιστεί μια συμβατική εκμετάλλευση και κατά πόσο αποτελεσματική μπορεί να είναι.

Η διπλωματική εργασία επικεντρώθηκε στο κομμάτι που αφορά τον σχεδιασμό των μεθόδων Drift n' fill και VCR ενώ δεν επικεντρώθηκε σε οικονομικά στοιχεία γιατί δεν ήταν διαθέσιμα τόσο οικονομικά δεδομένα όσο και δεδομένα που να αφορούν την περιεκτικότητα χρήσιμων συστατικών και την κατανομή τους στο κοίτασμα. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι ότι η μέθοδος VCR προσαρμόζεται χωρίς προβλήματα σε μια ήδη υπάρχουσα εκμετάλλευση ενώ ως αυτόνομη μέθοδος μπορεί να αποδώσει σε πολύ καλό βαθμό με προσεκτικό σχεδιασμό. Τα ποσοστά αραίωσης που προκύπτουν βάσει των συνθηκών εκμετάλλευσης κρίνονται ικανοποιητικά, ενώ ο σχεδιασμός των έργων προσπέλασης και προπαρασκευής κρίνεται ορθός και συνάμα αποτελεσματικός.

Λέξεις Κλειδιά: Υπόγεια μέθοδος εκμετάλλευσης, Ανεστραμμένος κρατήρας, Θεωρία Livingston, VCR, Cut n' Fill.

Abstract

The present diploma thesis studies the application of Vertical Crater Retreat (V.C.R.) for recovering the support pillars of a mining method with paste-filled stopes. The VCR method is a new underground mining method that uses crater theory, which belongs to engineer C.W. Livingston. The VCR method was used in initial trials, which showed great potential, thus earning the trust of mining companies for extended application in pillar recovery and even as a full-scale stand-alone mining method.

The thesis first presents the theoretical background of the VCR method. Afterwards, the CAD drawings for the development of the mining methods and their mode of operation are presented in detail. The drawings include a combined mining plan using the Drift n' Fill method to create the support pillars and the application of the VCR method to recover them. In addition, a second mining exploitation plan using the VCR method as a stand-alone mining method is presented. The drawings were made with AutoCAD Civil 3D software and the deposit they were drawn on is a real case situated in Australia called Kulthor. The plans are followed by the analysis of the data resulting from them, such as the volumes of the works constructed and the planned dilution and the relationship of preparatory mining works with the exploitation ones is calculated in each case. At the same time, a comparison is made between combinatorial mining exploitation and the stand-alone VCR mining method to examine the possibility of the VCR method competing with conventional mining exploitation and how effective it can be.

This diploma thesis focused on the design of the Drift n' fill and VCR mining methods, while it did not focus on economic data because no economic data and data regarding the content of useful components and their distribution in the orebody were available. The conclusions drawn are that the VCR mining method can be adapted without problems to an already existing mining operation, while as an autonomous method, it can perform well with careful planning. The dilution rates obtained based on the operating conditions are considered satisfactory, while the access and preparation works design is considered correct and effective simultaneously.

Keywords: Underground mining method, Inverted crater, Livingston crater theory, VCR, Cut n'Fill.

Περιεχόμενα

| | |
|--|------|
| Ευχαριστίες | iv |
| Περίληψη | v |
| Abstract..... | vii |
| Κατάλογος Σχημάτων | x |
| Κατάλογος Πινάκων | xiii |
| Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή | 1 |
| 1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας | 1 |
| 1.2 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας | 5 |
| 1.3 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας..... | 6 |
| Κεφάλαιο 2: Περιγραφή μεθόδου εκμετάλλευσης VCR | 7 |
| 2.1 Περιγραφή της μεθόδου ανεστραμμένου κρατήρα (VCR) | 7 |
| 2.1.1 Ιστορία της VCR..... | 7 |
| 2.1.2 Περιγραφή της θεωρίας κρατήρα Livingston και εφαρμογή της στην μέθοδο VCR | 8 |
| 2.1.3 Η παρουσία της μεθόδου VCR στον μεταλλευτικό κόσμο | 14 |
| 2.1.4 Έργα προσπέλασης | 15 |
| 2.1.5 Έργα προπαρασκευής μεθόδου VCR | 16 |
| 2.1.6 Έργα ανάπτυξης μεθόδου VCR..... | 19 |
| 2.1.7 Τρόπος εφαρμογής της μεθόδου VCR..... | 20 |
| 2.1.8 Προϋποθέσεις εφαρμογής της μεθόδου VCR..... | 24 |
| 2.1.9 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου VCR | 25 |
| 2.1.10 Εξοπλισμός εκμετάλλευσης της μεθόδου VCR..... | 26 |
| 2.2 Η μέθοδος Cut n' fill | 32 |
| 2.2.1 Αρχή λειτουργίας της μεθόδου | 32 |
| 2.2.2 Προϋποθέσεις μεθόδου Cut n' fill | 34 |
| 2.2.3 Λόγοι επιλογής της Drift n' fill με την VCR..... | 34 |

| | |
|---|-----|
| Κεφάλαιο 3: Σχεδιασμός εκμεταλλεύσεων..... | 36 |
| 3.1 Επιλεγθέν κοιτάσμα | 36 |
| 3.1.1 Γενικές πληροφορίες κοιτάσματος | 36 |
| 3.1.2 Χαρακτηριστικά μεταλλοφορίας. | 38 |
| 3.1.3 Άποψη του κοιτάσματος | 39 |
| 3.2 Σχεδιασμός μεθόδου Drift n' Fill | 42 |
| 3.2.1 Έργα προσπέλασης Drift n' Fill | 42 |
| 3.2.2 Έργα προπαρασκευής Drift n' Fill | 52 |
| 3.2.3 Έργα ανάπτυξης και εφαρμογή της μεθόδου Drift n' Fill | 58 |
| 3.3 Σχεδιασμός μεθόδου VCR | 63 |
| 3.3.1 Έργα προπαρασκευής VCR..... | 63 |
| 3.3.2 Έργα ανάπτυξης και εφαρμογή της μεθόδου VCR | 68 |
| 3.4 Σχεδιασμός της αυτόνομης μεθόδου VCR..... | 80 |
| 3.4.1 Έργα προσπέλασης της αυτόνομης μεθόδου VCR..... | 80 |
| 3.4.2 Έργα προπαρασκευής της αυτόνομης μεθόδου VCR..... | 81 |
| 3.4.3 Έργα ανάπτυξης και εφαρμογή της αυτόνομης μεθόδου VCR | 85 |
| Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα..... | 88 |
| Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα και προτάσεις για έρευνα..... | 97 |
| 5.1 Συμπεράσματα..... | 97 |
| 5.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα | 98 |
| Βιβλιογραφία | 100 |
| Παράρτημα Α: Τελικές τομές | 103 |

Κατάλογος Σχημάτων

| | |
|---|----|
| Σχήμα 1.1: Εφαρμογή της μεθόδου ανεστραμμένου κρατήρα (Hamrin, 2001) | 2 |
| Σχήμα 2.1: Εφαρμογή μηχανισμού ανατίναξης ανάστροφου κρατήρα (https://ergindustrial.com/scaled-depth-of-burial-explained/#!)..... | 9 |
| Σχήμα 2.2 Περιπτώσεις εφαρμογής μηχανισμού ανάστροφου κρατήρα για διαφορετικές αποστάσεις γόμωσης – επιφάνειας (https://ergindustrial.com/scaled-depth-of-burial-explained/#!) | 10 |
| Σχήμα 2.3: Γράφημα V/Q με Δ ((Kewei Liu, 2018)..... | 13 |
| Σχήμα 2.4: Άποψη παραγωγής σε μέτωπο της VCR (https://minewiki.engineering.queensu.ca) | 18 |
| Σχήμα 2.5: Τρόπος γόμωσης ενός διατρήματος στην μέθοδο VCR (Gertch & Bullock, 1998). | 20 |
| Σχήμα 2.6: Άποψη ενός ανάστροφου κρατήρα μετά την ανατίναξη ενός υπόνομου (Gertch & Bullock, 1998). | 21 |
| Σχήμα 2.7 Αναπαράσταση τμημάτων ανατινάζεων σε ένα μέτωπο (http://digistar.mb.ca/minsci/ug/vbm/vcr.htm) | 22 |
| Σχήμα 2.8: Τομή γομωμένου διατρήματος για την απόληψη του στύλου προστασίας κάτω από το επίπεδο διατρημάτων (Gertch & Bullock, 1998)..... | 23 |
| Σχήμα 2.9: Διατρητικό μηχανήμα DTH DU - 431 της εταιρείας Sandvik (Sandvik Group, 2023). | 27 |
| Σχήμα 2.10: Τμήματα κοπτικού άκρου ενδοδιατρηματικής σφύρας (Αγιουτάντης, 2019). | 27 |
| Σχήμα 2.11: Ο φορτωτής Scooptram ST14 SG της εταιρείας Epiroc (Epiroc, 2023). ... | 30 |
| Σχήμα 2.12: Φορητό υπογείων MT42 Battery της εταιρείας Epiroc (SSAB, 2022) | 31 |
| Σχήμα 2.13: Διατρητικό (Jumbo) Boomer S2 της εταιρείας Epiroc (Epiroc, 2023). | 31 |
| Σχήμα 2.14: Άποψη της μεθόδου Cut n' fill (Hamrin, 2001). | 33 |
| Σχήμα 3.1: Δορυφορική εικόνα εγκαταστάσεων Osborne και Kulthor..... | 37 |
| Σχήμα 3.2: Δορυφορική εικόνα συμπλέγματος οικιών Osborne. | 38 |
| Σχήμα 3.3: Τρισδιάστατη απεικόνιση του κοιτάσματος (GEOVIA, 2022)..... | 39 |
| Σχήμα 3.4 Εικόνα του κοιτάσματος (GEOVIA, 2022)..... | 40 |
| Σχήμα 3.5 Άποψη κοιτάσματος προς εκμετάλλευση κατά την παράταξη (GEOVIA, 2022) | 41 |

| | |
|--|----|
| Σχήμα 3.6: Άποψη του κοιτάσματος προς εκμετάλλευση σε τρισδιάστατη μορφή (GEOVIA, 2022). | 41 |
| Σχήμα 3.7: Ζώνη επιρροής στο κοίτασμα (τομή κατά την κλίση). | 43 |
| Σχήμα 3.8: Θέση των φρεάτων για την ανάπτυξη των έργων προσπέλασης και παραγωγής. | 46 |
| Σχήμα 3.9: Κεκλιμένες ράμπες εναλλασσόμενης κατεύθυνσης. | 47 |
| Σχήμα 3.10: Τρισδιάστατη απεικόνιση του φρέατος αερισμού και των κεκλιμένων ραμπών. | 48 |
| Σχήμα 3.11: Κάτοψη έργων προσπέλασης (μαζί με τις διευθυντικές και την κύρια στοά μεταφοράς). | 49 |
| Σχήμα 3.12 Τρισδιάστατη απεικόνιση της κύριας στοάς μεταφοράς, ελλείπει υπόλοιπων έργων | 50 |
| Σχήμα 3.13 Διαστάσεις και κάναβος διάτρησης μιας στοάς προσπέλασης | 51 |
| Σχήμα 3.14: Τρισδιάστατη απεικόνιση του συνόλου των έργων προσπέλασης, των διευθυντικών στοών και της κύριας στοάς μεταφοράς. | 52 |
| Σχήμα 3.15 : Διάταξη διευθυντικών στοών | 53 |
| Σχήμα 3.16: Όρυξη εγκάρσιας στοάς προσβολής πρώτου πατώματος (τομή κατά την κλίση του κοιτάσματος). | 54 |
| Σχήμα 3.17: Όρυξη ανώτερης εγκάρσιας στοάς προσβολής δεύτερου πατώματος (τομή κατά την κλίση του κοιτάσματος). | 55 |
| Σχήμα 3.18: Λιθογομωμένες στοές προσβολής ενός πλήρως εξοφλημένου ορόφου (τομή κατά την κλίση του κοιτάσματος). | 56 |
| Σχήμα 3.19: Τρισδιάστατη απεικόνιση του συνόλου των στοών προσβολής της μεθόδου Drift n' fill. | 56 |
| Σχήμα 3.20: Εικόνα του συνόλου των στοών προσβολής της μεθόδου Drift n fill (τομή κατά την κλίση του κοιτάσματος). | 57 |
| Σχήμα 3.21: Τρισδιάστατη απεικόνιση ενός λουκιού και του χώρου απόθεσης στην κύρια στοά μεταφοράς. | 58 |
| Σχήμα 3.22: Κατασκευή αρχικών έργων προσπέλασης (τομή κατά την παράταξη). | 59 |
| Σχήμα 3.23: Διαστάσεις μετώπων και μέθοδος όρυξης διατρημάτων ανατίναξης. | 60 |
| Σχήμα 3.24: Σειρά εξόρυξης μετώπων σε ένα τυχαίο πάτωμα (Κάτοψη). | 61 |
| Σχήμα 3.25: Τρισδιάστατη απεικόνιση ενός εξοφλημένου ορόφου της μεθόδου Drift n' fill. | 61 |
| Σχήμα 3.26: Σειρά εκμετάλλευσης ορόφων της μεθόδου Drift n' fill. | 62 |

| | |
|--|----|
| Σχήμα 3.27: Τομή κατά την παράταξη του κοιτάσματος με ολοκληρωμένη την μέθοδο Drift n' fill..... | 63 |
| Σχήμα 3.28: Στοές προσβολής σε ένα τυχαίο μέτωπο VCR..... | 64 |
| Σχήμα 3.29: Έργα προπαρασκευής ενός μετώπου VCR. | 65 |
| Σχήμα 3.30: Πρόσοψη και διαστάσεις μιας χοάνης. | 65 |
| Σχήμα 3.31: Κάτοψη - απόσπασμα επιπέδου υποσκαφής με διαστάσεις χοανών..... | 66 |
| Σχήμα 3.32: Απώλειες της μεθόδου VCR στο επίπεδο χοανών. | 66 |
| Σχήμα 3.33: Φορτίο θραυσμένου υλικού που αναλαμβάνει μια χοάνη..... | 67 |
| Σχήμα 3.34: Σύγκριση των τριών κατηγοριών μετώπων που υπάρχουν στην εκμετάλλευση VCR (πρόσοψη)..... | 69 |
| Σχήμα 3.35: Κάτοψη - απόσπασμα επιπέδου διατηρημάτων με διαστάσεις του κάναβου διάτρησης..... | 69 |
| Σχήμα 3.36: Τρισδιάστατη απεικόνιση κατακόρυφων διατηρημάτων σε ένα μέτωπο. ... | 70 |
| Σχήμα 3.37: Σχεδιασμός με υπόθεση σύγκλισης 2 διατηρημάτων (μέγιστο αποδεκτό σφάλμα). | 71 |
| Σχήμα 3.38: Φυσίγγια εκρηκτικού γαλακτώματος EM – EX (Extraco S.A., 2023) | 72 |
| Σχήμα 3.39: Συνολικά τμήματα ανατινάξεων ενός μετώπου 83 μέτρων. | 74 |
| Σχήμα 3.40: Παράδειγμα μετώπου με ακανόνιστη γεωμετρία του κοιτάσματος..... | 75 |
| Σχήμα 3.41: Συνολικά τμήματα ανατινάξεων ενός μετώπου 100 μέτρων. | 76 |
| Σχήμα 3.42: Σειρά εξόρυξης μετώπων της μεθόδου VCR. | 79 |
| Σχήμα 3.43: Τρισδιάστατη απεικόνιση εξέλιξης της μεθόδου VCR κατά την κατακόρυφο έννοια..... | 79 |
| Σχήμα 3.44: Εικόνα πλήρως εξοφλημένου κοιτάσματος με συνδυασμό των 2 μεθόδων υπόγειας εκμετάλλευσης..... | 80 |
| Σχήμα 3.45: Κάτοψη έργων προσπέλασης της αυτόνομης μεθόδου VCR..... | 81 |
| Σχήμα 3.46: Λούκια και κύρια στοά μεταφοράς μαζί με τα έργα προσπέλασης | 82 |
| Σχήμα 3.47: Υπόθεση όρυξης συμβατικών στοών προσβολής της αυτόνομης μεθόδου VCR. | 83 |
| Σχήμα 3.48: Τρισδιάστατη απεικόνιση πρόσβασης στα επίπεδα διατηρημάτων της αυτόνομης μεθόδου VCR | 84 |
| Σχήμα 3.49: Τρισδιάστατη απεικόνιση πρόσβασης σε μεγάλο αριθμό επιπέδων των μετώπων..... | 84 |
| Σχήμα 3.50 Κάτοψη έργων προσβολής των επιπέδων της αυτόνομης μεθόδου VCR... | 85 |
| Σχήμα 3.51: Σειρά εξόρυξης των μετώπων της αυτόνομης μεθόδου VCR..... | 86 |

| | |
|---|-----|
| Σχήμα 3.52: Άποψη εξοφλημένου κοιτάσματος με την αυτόνομη μέθοδο VCR..... | 87 |
| Σχήμα 4.1: Τομείς του κοιτάσματος της μεθόδου Drift n' fill για τον υπολογισμό της σχεδιαστικής αραίωσης (GEOVIA, 2022). | 91 |
| Σχήμα 4.2: Τομείς του κοιτάσματος της μεθόδου VCR για τον υπολογισμό της σχεδιαστικής αραίωσης (GEOVIA, 2022). | 93 |
| Σχήμα 4.3: Τομείς του κοιτάσματος της αυτόνομης μεθόδου VCR για τον υπολογισμό της σχεδιαστικής αραίωσης. | 96 |
| Σχήμα A.0.1:Κάτοψη του συνόλου των έργων της μεθόδου Drift n' fill..... | 104 |
| Σχήμα A.0.2:Τομή κατά την παράταξη του συνόλου των έργων της μεθόδου Drift n' fill..... | 105 |
| Σχήμα A.0.3:Τομή κατά την κλίση του συνόλου των έργων της μεθόδου Drift n' fill. | 106 |
| Σχήμα A.0.4:Τρισδιάστατη απεικόνιση του συνόλου των έργων της μεθόδου Drift n' fill..... | 107 |
| Σχήμα A.0.5:Κάτοψη του συνόλου των έργων της συνδυαστικής μεθόδου εκμετάλλευσης..... | 108 |
| Σχήμα A.0.6:Τομή κατά την παράταξη του συνόλου των έργων της συνδυαστικής μεθόδου εκμετάλλευσης | 109 |
| Σχήμα A.0.7:Τομή κατά την κλίση του συνόλου των έργων της συνδυαστικής μεθόδου εκμετάλλευσης..... | 110 |
| Σχήμα A.0.8:Τρισδιάστατη απεικόνιση του συνόλου των έργων της συνδυαστικής μεθόδου εκμετάλλευσης. | 111 |
| Σχήμα A.0.9:Κάτοψη του συνόλου των έργων της αυτόνομης μεθόδου VCR..... | 112 |
| Σχήμα A.0.10:Τομή κατά την παράταξη του συνόλου των έργων της αυτόνομης μεθόδου VCR..... | 113 |
| Σχήμα A.0.11:Τομή κατά την κλίση του συνόλου των έργων της αυτόνομης μεθόδου VCR | 114 |
| Σχήμα A.0.12:Τρισδιάστατη απεικόνιση του συνόλου των έργων της αυτόνομης μεθόδου VCR..... | 115 |

Κατάλογος Πινάκων

| | |
|---|----|
| Πίνακας 2.1: Πίνακας παραμέτρων E και Δ βάσει αντοχής μεταλλεύματος (iRing.inc, 2023) | 11 |
|---|----|

| | |
|---|----|
| Πίνακας 2.2: Μεταλλεία του λεκανοπεδίου Sudbury που εφαρμόζουν την μέθοδο VCR (Hustrulid, 2001)..... | 14 |
| Πίνακας 3.1: Διατομές φρεάτων βάσει ετήσιας παραγωγής και τρόπου ανέλκυσης (Οικονομόπουλος, 1989). | 43 |
| Πίνακας 4.1: Όγκοι έργων προσπέλασης της μεθόδου Drift n' fill. | 88 |
| Πίνακας 4.2: Όγκοι έργων προπαρασκευής της μεθόδου Drift n' fill. | 89 |
| Πίνακας 4.3: Όγκοι έργων προπαρασκευής της μεθόδου VCR. | 90 |
| Πίνακας 4.4: Όγκοι λιθογόμωσης στην μέθοδο VCR. | 90 |
| Πίνακας 4.5: Στοιχεία σχεδιαστικής αραίωσης της μεθόδου Drift n' fill. | 91 |
| Πίνακας 4.6: Στοιχεία σχεδιαστικής αραίωσης της μεθόδου VCR. | 93 |
| Πίνακας 4.7: Όγκοι έργων προσπέλασης της αυτόνομης μεθόδου VCR. | 94 |
| Πίνακας 4.8: Όγκοι των έργων προπαρασκευής της αυτόνομης μεθόδου VCR. | 94 |
| Πίνακας 4.9: Όγκοι λιθογόμωσης της αυτόνομης μεθόδου VCR. | 95 |
| Πίνακας 4.10: Στοιχεία σχεδιαστικής αραίωσης της αυτόνομης μεθόδου VCR. | 96 |

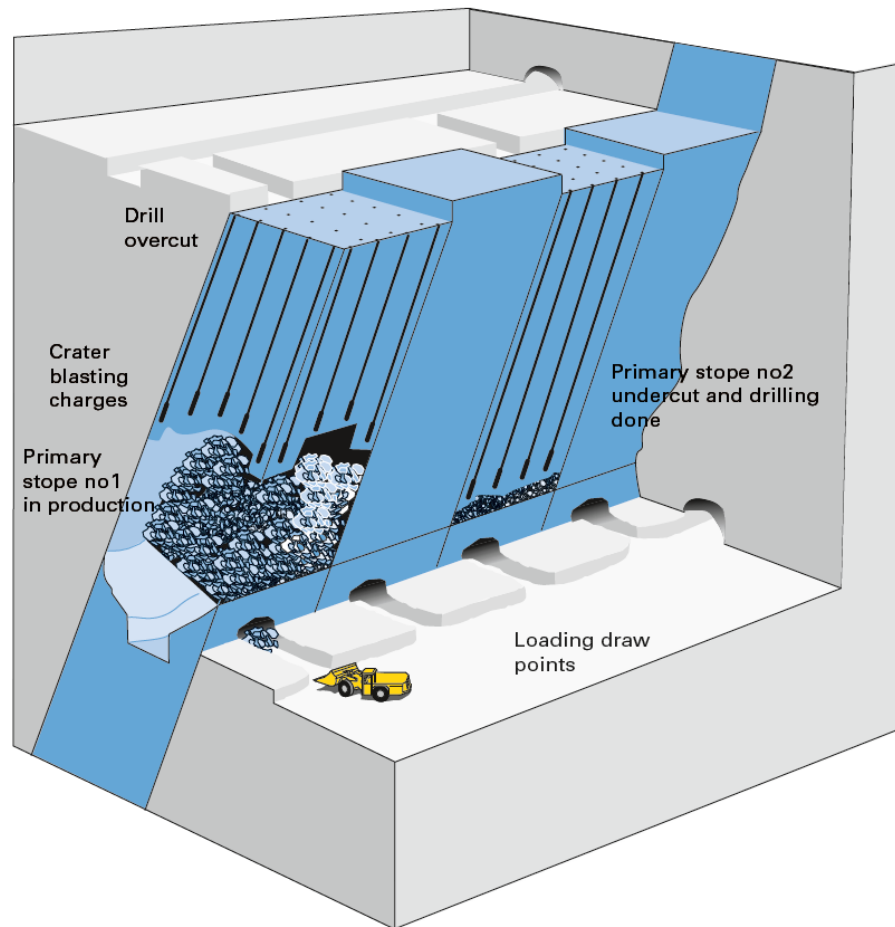
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Είναι ευρέως γνωστό πως για την εξόρυξη του ορυκτού πλούτου μιας χώρας, από αρχαιοτάτων χρόνων, υπάρχουν δύο κατηγορίες μεθόδων εκμετάλλευσης. Υπάρχουν οι υπόγειες μέθοδοι εκμετάλλευσης, οι υπαίθριες μέθοδοι εκμετάλλευσης καθώς και σε ορισμένες περιπτώσεις ο συνδυασμός των δύο παραπάνω κατηγοριών.

Κατά την εκμετάλλευση με την χρήση της υπόγειας μεθόδου Drift n' fill, σε πολλές περιπτώσεις κοιτασμάτων, δεν είναι δυνατό να εξορυχθεί όλο το κοίτασμα χωρίς να αφεθούν στρατηγικά κάποια τμήματα του ανέπαφα. Τα τμήματα αυτά, χρησιμεύουν ως πλευρικοί στύλοι προστασίας. Οι πλευρικοί στύλοι προστασίας είναι απαραίτητοι ώστε να διασφαλιστεί η στατική ισορροπία των μετώπων εργασίας και να μην κινδυνεύσουν ανθρώπινες ζωές. Οι στύλοι προστασίας, ανάλογα την μέθοδο που εφαρμόζονται και σε συνδυασμό με άλλες παραμέτρους (μηχανικές ιδιότητες, αξία μεταλλεύματος κ.α.), είτε θα αφεθούν μόνιμα να υποστηρίζουν τα τμήματα του μεταλλείου, είτε θα ανακτηθούν μερικώς ή ολικώς.

Η μέθοδος VCR αναπτύχθηκε με σκοπό την ανάκτηση στύλων προστασίας (Σχήμα 1.1). Η αρχή λειτουργίας της βασίζεται στην θεωρία κρατήρα η οποία αναπτύχθηκε από τον C.W. Livingston και κατοχυρώθηκε ως πατέντα (U.S.A. Patent No. US3735704A, 1970). Πρόκειται για μια παρεξηγημένη μέθοδο, την νεότερη που έχει αναπτυχθεί σήμερα στον χώρο των υπόγειων εκμεταλλεύσεων, και αυτό οφείλεται στην χρήση των διατρημάτων μεγάλου μήκους. Αρχικά υπήρχαν αμφιβολίες για την αποτελεσματικότητα της άλλα με την επαναλαμβανόμενη δοκιμασία της απεδείχθη αρκετά χρήσιμη και αξία εμπιστοσύνης για περεταίρω εφαρμογή και έρευνα. Λόγω της απλότητας της, αλλά και του τρόπου της να εξορύσσει με καλή ακρίβεια τα μέτωπα στα οποία εφαρμόζεται, αποτελεί μια άκρως επιτυχημένη μέθοδο που όλο και περισσότερο εφαρμόζεται σήμερα σε μεταλλεία όπου πληρούνται οι προϋποθέσεις χρήσης της. Η μέθοδος παρόλο που αναπτύχθηκε ως συμπληρωματική είναι δυνατό να εφαρμοστεί και αυτόνομα ως κύρια μέθοδος εκμετάλλευσης.



Σχήμα 1.1: Εφαρμογή της μεθόδου ανεστραμμένου κρατήρα (Hamrin, 2001)

Επιπλέον, η VCR τοποθετείται στην κατηγορία των υπόγειων μεθόδων εκμετάλλευσης με φυσική υποστήριξη του αγγλοσαξονικού συστήματος ταξινόμησης. Το σύστημα αυτό περιέχει 3 + 1 κατηγορίες μεθόδων οι οποίες ταξινομούν τις μεθόδους εκμετάλλευσης με βάση τις μηχανικές ιδιότητες του μητρικού πετρώματος και του περιβάλλοντος πετρώματος. Οι κατηγορίες είναι οι εξής (Εξαδάκτυλος, 2005) :

- Μέθοδοι με ανοίγματα τα οποία έχουν φυσική υποστήριξη (απουσιάζει η τεχνητή υποστήριξη).
- Μέθοδοι με ανοίγματα που απαιτούν τεχνητή υποστήριξη (πρόσθετη υποστήριξη)
- Μέθοδοι με κατακρήμνιση οροφής
- Μέθοδοι με κατακρήμνιση οροφής η οποία συμβαίνει σε δεύτερη φάση.

Η βιβλιογραφία για την μέθοδο VCR είναι αρκετά περιορισμένη, ωστόσο θα γίνει μια σύντομη αναφορά σε δημοσιευμένα άρθρα περιοδικών σχετικά με την έρευνα που έχει γίνει για την μέθοδο.

Στο άρθρο του Xiaotan (1985) με τίτλο «Stability analysis and parameter optimization of VCR stopes» μελετάται η κατανομή των τάσεων σε καθεστώς πολυαξονικής εντατικής κατάστασης των μετώπων της μεθόδου VCR και η σταθερότητα τους, με την χρήση της μεθόδου μετατόπισης ασυνεχειών (Displacement Discontinuity Method). Με βάση τα αποτελέσματα της έρευνας, καθορίζονται ο καθορισμός των μετώπων, η αλληλουχία εξόρυξης και ο αριθμός των μετώπων που εξορύσσονται στον ίδιο χρόνο. Η έρευνα που παρουσιάζεται στην δημοσίευση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βάση για την εξέταση της σταθερότητας των μετώπων VCR καθώς και την βελτιστοποίηση των παραμέτρων που αφορούν την εξόρυξη των μετώπων (Xiaotan, 1985).

Ο J. Muir (1988) στο άρθρο του με τίτλο «Small block VCR mining at Homestake» μελετάει τις ελάχιστες διαστάσεις που πρέπει να έχει ένα μέτωπο ώστε να είναι οικονομικά βιώσιμη η εκμετάλλευση του με την μέθοδο VCR. Η μελέτη αφορά το πραγματικό μεταλλείο Homestake και εξετάστηκαν διάφορες παράμετροι ο έλεγχος των τάσεων και οι κλίσεις ανατίναξης με επακόλουθη την σύγκριση του κόστους και του προγραμματισμού εκμετάλλευσης με δύο παραλλαγές της μεθόδου διαδοχικών κοπών και λιθογομώσεων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η VCR εφαρμόζεται με επιτυχία σε συνεχή μέτωπα με κλίση μεγαλύτερη των 60 μοιρών με μέταλλευμα 50000 τόνων ενώ παρέχει καλύτερη παραγωγικότητα (Muir, 1988). Στο ίδιο μεταλλείο Homestake που αναφέρεται το προηγούμενο άρθρο τοποθετείται και το άρθρο του Mitchell (1980) με τίτλο «Vertical Crater Retreat stoping proves successful at Homestake mine» το οποίο περιγράφει τον τρόπο και τις συνθήκες εκμετάλλευσης των μετώπων με την μέθοδο VCR (Mitchell, 1980).

Ένα επίσης σημαντικό άρθρο με συγγραφέα τον Don. A. Trotter (1991) και τίτλο «Vertical Crater Retreat mining in the Sudbury basin» περιέχει μια αναλυτική περιγραφή της μεθόδου VCR με αναφορά στο λεκανοπέδιο Sudbury του Καναδά το οποίο είναι η «γενέτειρα» της μεθόδου. Πιο συγκεκριμένα, αναφέρονται περιπτώσεις μεταλλείων όπου χρησιμοποιείται η μέθοδος VCR και αναφέρονται ιστορικά στοιχεία, η ανάπτυξη των διατηρημάτων μεγάλου βάθους, τρόποι υποστήριξης των μετώπων και ο απαιτούμενος εξοπλισμός για την εκμετάλλευση (Trotter, 1991). Στο ίδιο μήκος κύματος με το προηγούμενο κινείται και το άρθρο του Lang (1977) με τίτλο «Vertical Crater Retreat an important new mining method» που αναφέρει την θεωρία του κρατήρα και τον τρόπο που η εταιρεία INCO την αξιοποίησε «γεννώντας» την μέθοδο VCR (L.C. Lang, 1977).

Επιπλέον, ο Nan Jiang (2015) στο άρθρο του με τίτλο «Damage characteristics of surrounding rock subjected to VCR mining blasting shock» εστιάζει στο πρόβλημα φθοράς του περιβάλλοντος πετρώματος από τις ανατινάξεις στην μέθοδο VCR μελετώντας τα χαρακτηριστικά της με χρήση γραμμικής ανάλυσης και δοκιμής υπέρηχων. Η έρευνα εν τέλει προχώρησε στην εξέταση της σχέσης μεταξύ της ποσότητας της εκρηκτικής ύλης και της εμβέλειας της ζημίας που προκαλείται στο περιβάλλον πέτρωμα. Το ερευνητικό έργο του άρθρου μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως θεωρητική βάση για τον έλεγχο των ορίων (παρυφών) των μετώπων και για την βελτιστοποίηση των παραμέτρων της ανατίναξης (Nan Jiang, 2015)

Ο Kewei Liu (2018) στο άρθρο του με τίτλο «Study on the long – hole raising technique using one blast based on vertical crater retreat multiple deck shots» ερευνήσε κατά πόσο είναι εφικτό να χρησιμοποιηθεί η τεχνολογία VCR για την όρυξη ενός καμινέτου με μια ανατίναξη από ένα σπήλαιο προς την επιφάνεια. Σε ένα υπόγειο μεταλλείο είχαν αφεθεί «κενά» (σπηλαιώσεις) τα οποία δεν πληρώθηκαν ποτέ με λιθογόμωση και ακριβώς από πάνω αναπτύχθηκε ένα μεταλλείο υπαίθριας εκμετάλλευσης. Ο κίνδυνος κατάρρευσης του στρώματος από την επιφάνεια προς τις σπηλαιώσεις είναι μεγάλος και συνεπώς έπρεπε να βρεθεί μια λύση. Η όρυξη καμινέτων με την χρήση της τεχνολογίας VCR για την έγχυση λιθογόμωσης στα σπήλαια εξετάστηκε ως λύση στην παρούσα δημοσίευση. Αρχικά έγιναν δοκιμαστικές ανατινάξεις για την ανάκτηση των κρίσιμων δεδομένων για τον σχεδιασμό μιας ανατίναξης με την μέθοδο VCR. Ακολούθως έγινε ένας σχεδιασμός για την κατασκευή ενός καμινέτου 30 μέτρων πάνω από ένα σπήλαιο με 2 ανατινάξεις (στα 12 και στα 18 μέτρα) με την μέθοδο VCR. Το καμινέτο «ανοίχθηκε» και από την εξέταση των αποτελεσμάτων παρατηρήθηκε ότι η ύπαρξη διπλής ελεύθερης επιφάνειας (το κενό της σπηλαιώσης και η επιφάνεια του εδάφους) είναι ένα πλεονέκτημα που πρέπει να ενισχυθεί και εκμεταλλευτεί στο έπακρο ενώ, τα μικρότερα τμήματα ανατίναξης σε συνδυασμό με μια τροποποιημένη αλληλουχία έναρξης των ανατινάξεων βοηθούν στην επέκταση του καμινέτου. Επιπρόσθετα, με συνδυασμό αναλυτικών μοντέλων και των προηγούμενων αποτελεσμάτων έγιναν νέες τροποποιήσεις στον κάναβο ανατίναξης, στην γόμωση και στον χρονισμό των ανατινάξεων. Με τις τελευταίες αλλαγές το αποτέλεσμα ήταν μια επιτυχής μοναδική ανατίναξη ενός 32 μέτρων καμινέτου (Kewei Liu, 2018).

Το άρθρο του Feng Gao (2023) με τίτλο «Refined Design and Optimization of Underground Medium and Long Hole Blasting Parameters - A Case Study of the Gaofeng

Mine» αφορά μια πραγματική υπόθεση στο μεταλλείο Gaofeng της Κίνας. Στην συγκεκριμένη δημοσίευση ερευνήθηκε με την χρήση ανατινάξεων τύπου ανεστραμμένου κρατήρα και λογισμικών γραμμικής ανάλυσης η βελτιστοποίηση των παραμέτρων ανατίναξης ενός μέτριου βάθους διατρήματος υπόγειας ανατίναξης. Πιο συγκεκριμένα με την ανατίναξη ενός διατρήματος με την μέθοδο ανεστραμμένου κρατήρα, ανακτήθηκαν δεδομένα ανατίναξης τα οποία βελτιστοποιήθηκαν και αναλύθηκαν από το λογισμικό LS – DYNA και το αποτέλεσμα της ανάλυσης αυτής αποδόθηκε σε μια πραγματική ανατίναξη ενός διατρήματος μετρίου βάθους. Το αποτέλεσμα της έρευνας ήταν ότι η γραμμική ανάλυση σε συνδυασμό με την μέθοδο ανατίναξης ανεστραμμένου κρατήρα μπορεί να βελτιστοποιήσει τον σχεδιασμό και την αποτελεσματικότητα της ανατίναξης ενός μετρίου βάθους διατρήματος (Feng Gao, 2023).

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει να προσθέσει στην παραπάνω βιβλιογραφία δύο περιπτώσεις σχεδιασμού εφαρμογής της μεθόδου VCR σε ένα πραγματικό υπόγειο κοίτασμα. Η πρώτη αφορά την εφαρμογή της μεθόδου για την ανάκτηση στύλων υποστήριξης μιας μεθόδου με λιθογομούμενα μέτωπα. Η δεύτερη περίπτωση αφορά την εφαρμογή της μεθόδου VCR απολύτως αυτόνομα στο ίδιο κοίτασμα. Οι δύο περιπτώσεις αναδεικνύονται με αναλυτικά τρισδιάστατα σχέδια και παρατηρείται ο τρόπος που προσαρμόζεται η μέθοδος, η αποτελεσματικότητά της, και η σχεδιαστική αραίωση του μεταλλεύματος με το περιβάλλον πέτρωμα.

1.2 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία η περίπτωση που θα ερευνηθεί, αφορά ένα πραγματικό κοίτασμα στο οποίο θα εφαρμοστεί η μέθοδος VCR για την ανάκτηση των στύλων υποστήριξης μιας μεθόδου με λιθογομούμενα μέτωπα. Θα εφαρμοστεί πρώτα η μέθοδος Drift n' fill (παραλλαγή της υπόγειας μεθόδου εκμετάλλευσης διαδοχικών κοπών και λιθογομώσεων (Cut n' fill)) ώστε να εκμεταλλευτεί το μεγαλύτερο ποσοστό του κοιτάσματος και θα αφεθούν κάποιοι μόνιμοι στύλοι προστασίας, ώστε η εκμετάλλευση να γίνει με ασφάλεια. Μέσω των σχεδίων θα αναδειχθεί ο τρόπος λειτουργίας της μεθόδου VCR, η προσαρμοστικότητα και η αποτελεσματικότητά της. Παράλληλα, θα μελετηθεί και κατά πόσο η VCR μπορεί να εφαρμοστεί ως αυτόνομη μέθοδος εκμετάλλευσης στο ίδιο κοίτασμα. Η παραπάνω εκδοχή θα σχεδιαστεί αφενός για λόγους σύγκρισης των δύο περιπτώσεων (συνδυαστικής εκμετάλλευσης και αυτόνομης) και αφετέρου για μια

ολοκληρωμένη παρουσίαση της μεθόδου VCR που αποτελεί και το αντικείμενο έρευνας της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

1.3 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας

Η διπλωματική εργασία σε πρώτη φάση στο 2^ο κεφάλαιο παρουσιάζει εκτενώς το θεωρητικό υπόβαθρο της μεθόδου VCR. Ταυτόχρονα θα γίνει μια σύντομη αναφορά στην μέθοδο Drift n' Fill καθώς θα είναι η μέθοδος που θα εφαρμόσει την λιθογόμωση εκατέρωθεν των στύλων προστασίας. Εν συνεχεία, στο 3^ο κεφάλαιο, θα παρουσιαστεί πρώτα το κοίτασμα που επιλέχθηκε για την εκπόνηση των σχεδίων. Ο αναγνώστης έχοντας πλέον μια σφαιρική άποψη περί της μεθόδου ανεστραμμένου κρατήρα και γνωρίζοντας μερικές πληροφορίες για το κοίτασμα, θα συναντήσει τα πρώτα σχέδια όπου περιγράφεται αναλυτικά ο τρόπος εφαρμογής της μεθόδου Drift n' Fill και η μετέπειτα ανάκτηση των στύλων υποστήριξης με την μέθοδο VCR. Στο ίδιο κεφάλαιο, θα παρουσιαστούν και τα σχέδια της αυτόνομης μεθόδου VCR. Στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τα σχέδια, τα συμπεράσματα και οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα. Τέλος, παρατίθεται η βιβλιογραφία και το παράρτημα στο οποίο βρίσκονται οι τελικές μορφές των σχεδίων, ώστε ο αναγνώστης να έχει μια πλήρη εικόνα της προσπάθειας που καταβλήθηκε για την απόδοση του σχεδιασμού των εκμεταλλεύσεων.

Η παρούσα διπλωματική εργασία προσφέρει μια άποψη του τρόπου εφαρμογής της μεθόδου VCR ως κύρια μέθοδος εκμετάλλευσης και ως μέθοδος απόληψης στύλων υποστήριξης. Επιπλέον, από τα συμπεράσματα προκύπτουν μερικές ενδείξεις για την αποτελεσματικότητα της. Ο αναγνώστης λοιπόν, πέραν της κατανόησης της μεθόδου VCR, ορμώμενος από την ανάγνωση της παρούσας εργασίας, μπορεί να ερευνήσει τις πτυχές του σχεδιασμού που δεν εξετάστηκαν και να αναζητήσει τρόπους βελτιστοποίησης του σχεδιασμού της μεθόδου.

Κεφάλαιο 2: Περιγραφή μεθόδου εκμετάλλευσης VCR

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναφερθεί εκτεταμένα η θεωρία και ο τρόπος εφαρμογής της μεθόδου ανεστραμμένου κρατήρα ενώ, θα γίνει και μια σύντομη αναφορά στην μέθοδο Cut n' fill καθώς κρίνεται αναγκαίο.

2.1 Περιγραφή της μεθόδου ανεστραμμένου κρατήρα (VCR)

2.1.1 Ιστορία της VCR

Η μέθοδος υποχωρούντος ανεστραμμένου κρατήρα (Vertical Crater Retreat, VCR) είναι μια μέθοδος υπόγειας εκμετάλλευσης, η οποία αναπτύχθηκε από την καναδική εταιρεία INCO το 1975. Η μέθοδος ήταν εφικτό να εφαρμοστεί καθώς εισήχθησαν στον χώρο των εξορύξεων τα μεγάλου μήκους διατρήματα, μεγέθους 165 χιλιοστών. (Hustrulid, 2001) Η μέθοδος έχει ως βασική αρχή λειτουργίας την θεωρία του κρατήρα του μηχανικού C.W. Livingston που την ανέπτυξε και απέκτησε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας (U.S.A. Patent No. US3735704A, 1970).

Η Καναδική εταιρεία χρησιμοποιώντας την πατέντα του Livingston, ανέπτυξε την μέθοδο και την εφάρμοσε για την ανάκτηση των στύλων υποστήριξης μετώπων που εξορύσσονταν με άλλες μεθόδους εκμετάλλευσης. Οι λόγοι για την ανάκτηση των στύλων προστασίας ποικίλουν. Ένας συνήθης λόγος για τον οποίο μια μεταλλευτική εταιρεία θα εμπλακεί σε μια τέτοια διαδικασία είναι η μεγιστοποίηση του κέρδους. Η αγορά των μετάλλων είναι γνωστό ότι βρίσκεται σε μια δυναμική κατάσταση. Συνεπώς, είναι δυνατό σε ένα εύλογο χρονικό διάστημα, η τιμή ενός μετάλλου που έχει εξορυχθεί σε ένα μεταλλείο όπου έχουν αφεθεί στύλοι προστασίας να πολλαπλασιαστεί σε βαθμό που να είναι οικονομικά βιώσιμη η ανάκτηση των τελευταίων. Η INCO mining, εισήγαγε στον χώρο των υπόγειων εκμεταλλεύσεων μια αποτελεσματική μέθοδο, η οποία με τον καιρό εξελίχθηκε και χρησιμοποιείται και ως αυτόνομη μέθοδος μιας υπόγειας εκμετάλλευσης (Hustrulid, 2001). Αξίζει να σημειωθεί ότι η τεχνική της μεθόδου VCR μπορεί να εφαρμοστεί και ως μέθοδος όρυξης κεκλιμένων ή κατακόρυφων καμινέτων. Η προσεκτική σχεδίαση και ανατίναξη σε συνδυασμό με επαρκή αερισμό μπορεί να προσφέρει γρηγορότερη και πιο ασφαλή εξόρυξη σε σύγκριση με μια συμβατική μέθοδο όρυξης. Εμπειρικά ισχύει ότι η τεχνική της μεθόδου VCR μπορεί να εφαρμοστεί για την κατασκευή

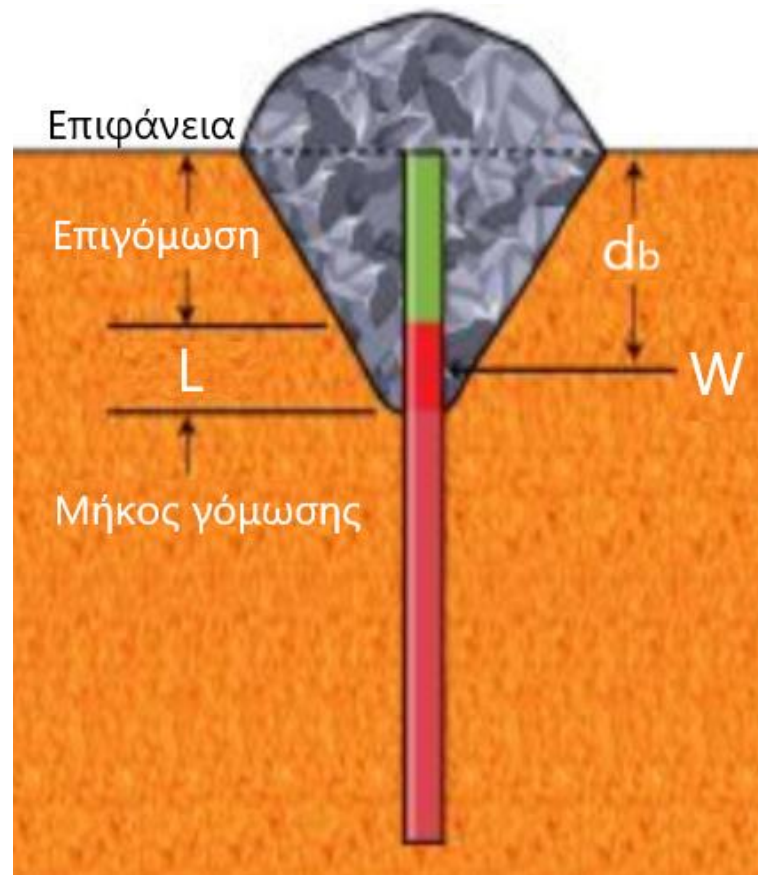
καμινέτων με ελάχιστο εμβαδόν διατομής 9 τετραγωνικών μέτρων (Gertch & Bullock, 1998).

2.1.2 Περιγραφή της θεωρίας κρατήρα Livingston και εφαρμογή της στην μέθοδο VCR

Ο C.W. Livingston ανέπτυξε την θεωρία του ανάστροφου κρατήρα καθώς ερευνούσε φαινόμενα ανατίναξης και ουσιαστικά ανέδειξε τον μηχανισμό ανατίναξης ενός σφαιρικά γομωμένου διατρήματος. Ένα σφαιρικά γομωμένο διάτρημα θα διοχετεύσει την ενέργεια της έκρηξης προς όλες τις κατευθύνσεις, ενώ ένα κυλινδρικά γομωμένο διάτρημα θα την διοχετεύσει κυρίως πλευρικά του διατρήματος. Ο Livingston απέδειξε ότι η ανατίναξη ενός κυλινδρικά γομωμένου διατρήματος μπορεί, υπό προϋποθέσεις, να αποδώσει όπως και εκείνη ενός σφαιρικά γομωμένου διατρήματος. Η ανατίναξη σε μορφή κρατήρα είναι μια ανατίναξη η οποία προέρχεται από ένα σφαιρικά γομωμένο διάτρημα και αναπτύσσεται προς κάθε κατεύθυνση με ακτίνα επιρροής μεγαλύτερη από αυτήν του περιβάλλοντος πετρώματος του διατρήματος (Gertch & Bullock, 1998).

Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 2.1, οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη για μια ανατίναξη που θα έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ενός κρατήρα είναι :

- Το μήκος της γόμωσης του διατρήματος (L)
- Το βάρος της εκρηκτικής ύλης που χρησιμοποιείται ως γόμωση (W)
- Η απόσταση του κέντρου βάρους της γόμωσης από την ελεύθερη επιφάνεια (d_b).
- Η ισχύς του εκρηκτικού που χρησιμοποιείται.

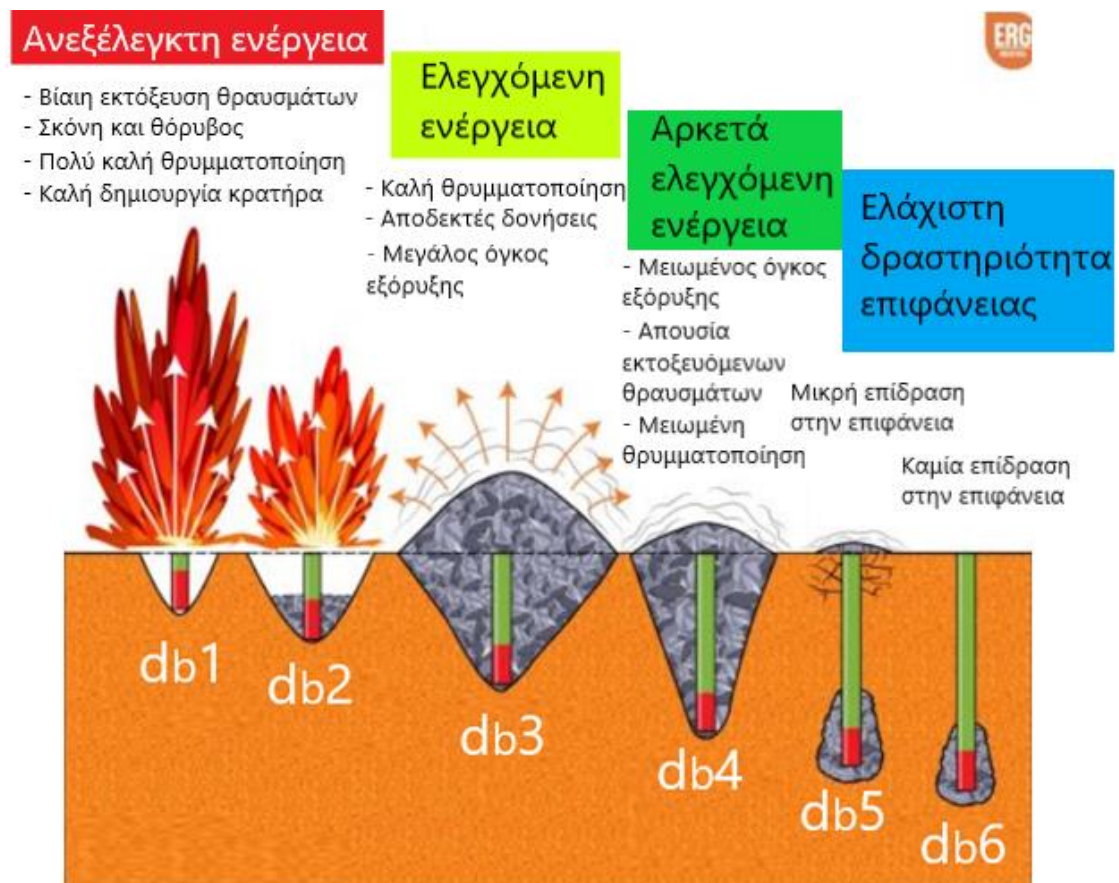


Σχήμα 2.1: Εφαρμογή μηχανισμού ανατίναξης ανάστροφου κρατήρα (<https://ergindustrial.com/scaled-depth-of-burial-explained/#!>)

Το μήκος γόμωσης είναι τυποποιημένο και ισούται με 6 φορές την διάμετρο του διατρήματος, η οποία επίσης είναι τυποποιημένη και ίση με 165 χιλιοστά. Το βάρος της εκρηκτικής ύλης εξαρτάται από την πυκνότητα και το είδος του εκρηκτικού που θα επιλεγεί και στην πλειοψηφία των περιπτώσεων χρησιμοποιούνται γαλακτώματα και πετραμμωνίτης (ANFO). Όπως γίνεται αντιληπτό, ο παράγοντας που μεταβάλλεται και διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στο αποτέλεσμα της ανατίναξης, εκτός από το βάρος του εκρηκτικού, είναι το βάθος στο οποίο θα τοποθετηθεί η γόμωση του διατρήματος.

Στο Σχήμα 2.2 παρατηρείται (για ίδια μάζα εκρηκτικής ύλης και μήκος γόμωσης), ότι η γόμωση σε μικρή απόσταση από την ελεύθερη επιφάνεια (περιπτώσεις με τιμές d_{b1} και d_{b2}) επιφέρει ανεξέλεγκτη ενέργεια η οποία δημιουργεί τέλεια θραύση πετρώματος και πλήρη σχηματισμό κρατήρα. Η παραπάνω περίπτωση όμως δεν εξυπηρετεί τον σκοπό εκμετάλλευσης πετρώματος καθώς θρυμματίζει μικρό όγκο πετρώματος και είναι εξαιρετικά επικίνδυνη καθώς θραύσματα εκτινάσσονται βίαια προς πάσα κατεύθυνση. Από την άλλη, η τοποθέτηση γόμωσης σε αρκετά μεγάλο βάθος (περιπτώσεις με τιμές d_{b5} και d_{b6}) προκαλεί ρωγμές στο γύρω περιβάλλον πέτρωμα αλλά δεν θραύει το πέτρωμα που

βρίσκεται ενδιάμεσα της γόμωσης και της ελεύθερης επιφάνειας και δεν δημιουργεί κρατήρα. Συνεπώς, η περίπτωση που ιδανικά εφαρμόζει στην εκμετάλλευση της όγκου πετρώματος με αυτή την μέθοδο, είναι εκείνη όπου, η ενέργεια της ανατίναξης διοχετεύεται κατάλληλα στο περιβάλλον πέτρωμα με αποτέλεσμα αυτό να υποστεί ικανοποιητική θραύση, χωρίς να εκτοξεύονται θραύσματα και με ελάχιστες δονήσεις (περιπτώσεις με τιμές d_{b3} και d_{b4}) (Σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.2 Περιπτώσεις εφαρμογής μηχανισμού ανάστροφου κρατήρα για διαφορετικές αποστάσεις γόμωσης – επιφάνειας (<https://ergindustrial.com/scaled-depth-of-burial-explained/#/>)

Στο πείραμα του Livingston παρατηρήθηκε ότι ο τρόπος που η μεταβολή της ενέργειας μεταφέρεται από το εκρηκτικό στο στερεό πέτρωμα είναι ο ίδιος όταν αυξάνεται το βάρος του εκρηκτικού ενώ το βάθος είναι σταθερό και αντίστοιχα όταν μειώνεται το βάθος ενώ το βάρος του εκρηκτικού είναι σταθερό. Το βάθος για το οποίο οριακά παρατηρείται αστοχία στην επιφάνεια ονομάζεται κρίσιμο βάθος ($d_{critical}$) και το αντίστοιχο βάρος εκρηκτικού που χρησιμοποιήθηκε, κρίσιμο βάρος ($W_{critical}$). Η εξίσωση που συνδέει της παραπάνω μεταβλητές είναι (Αγιουτάντης, 2019):

$$d_c = E \cdot W_c^{\frac{1}{3}} \quad (2.1)$$

Όπου :

- d_c = Η κρίσιμη απόσταση (ft)
- E = Ο συντελεστής ενέργειας παραμόρφωσης (Σταθερά που εξαρτάται από το πέτρωμα)
- W_c = Το κρίσιμο βάρος του εκρηκτικού (lb)

Η μελέτη για την χρήση της μεθόδου VCR σε ένα μέτωπο έχει μια διαδικασία. Αρχικά, επιλέγεται μια περιοχή όσο πιο κοντά γίνεται στο συγκεκριμένο μέτωπο ώστε να μην υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις στα αποτελέσματα λόγω γεωλογίας. Στην περιοχή αυτή θα ορυχθεί της ικανός αριθμός (15-25) διατρημάτων για να διεξαχθούν δοκιμές μικρής κλίμακας. Στις δοκιμές αυτές, τα διατρήματα γομώνονται σε διαφορετικά βάθη (d_b) με το ίδιο βάρος εκρηκτικής ύλης. Η εύρεση του κατάλληλου εκρηκτικού μπορεί να γίνει βιβλιογραφικά είτε με σύγκριση των δεδομένων που προκύπτουν από της πειραματικές ανατινάξεις διαφόρων εκρηκτικών, στις ίδιες όμως συνθήκες. Η σύγκριση των εκρηκτικών μπορεί να γίνει με χρήση της «Εξίσωσης διαδικασίας διάσπασης» (Livingston's Breakage Process Equation) (Lang, 1983). Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι κάθε εκρηκτικό συμπεριφέρεται διαφορετικά σε κάθε σχηματισμό και τα αποτελέσματα των δοκιμών αφορούν αποκλειστικά και μόνο το μέτωπο στο οποίο διεξήχθησαν. Η εταιρεία iRing.inc διαθέτει μετά από την διεξαγωγή δοκιμών μια γενική κατεύθυνση στις τιμές των παραμέτρων E και Δ_0 συναρτήσει της αντοχής του μεταλλεύματος (iRing.inc, 2023).

Πίνακας 2.1: Πίνακας παραμέτρων E και Δ βάσει αντοχής μεταλλεύματος (iRing.inc, 2023)

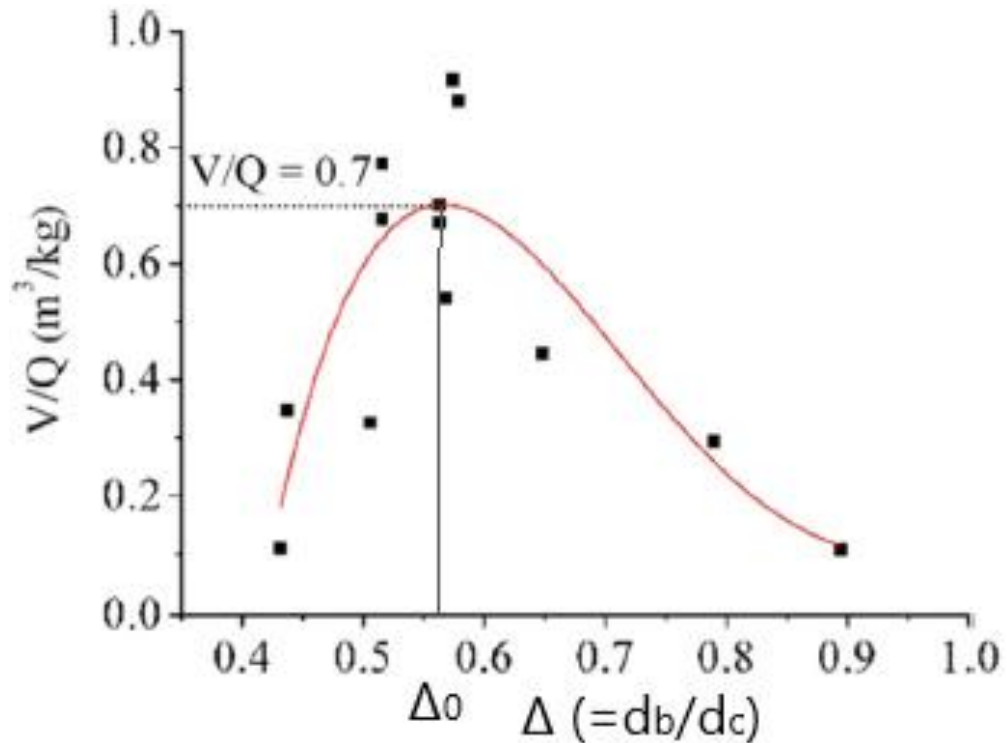
| Αντοχή μεταλλεύματος | Παράμετρος E | Παράμετρος Δ_0 |
|----------------------|----------------|-----------------------|
| Υψηλή | 4.3 | 0.33 |
| Μέτρια | 3.4 | 0.46 |
| Χαμηλή | 2.5 | 0.55 |

Η γόμωση των διατρημάτων σε διαφορετικό βάθος θα επηρεάσει το αποτέλεσμα της ανατίναξης. Σε ορισμένα διατρήματα θα παρουσιαστεί βέλτιστος κρατήρας (μικρή τιμή d_b) ενώ σε άλλα θα παρουσιαστούν ρωγμές στο έδαφος χωρίς την παρουσία κρατήρα (μεγάλη τιμή d_b). Με αυτόν τον τρόπο βρίσκεται πειραματικά το κρίσιμο βάθος (d_c). Ταυτόχρονα, γνωρίζοντας το βάρος της εκρηκτικής ύλης που χρησιμοποιήθηκε (το

οποίο συμβολίζεται με W_c), δύναται να υπολογιστεί από την εξ. (2.1) ο συντελεστής ενέργειας παραμόρφωσης E . Επιπλέον από τις δοκιμαστικές ανατινάξεις των υπονόμων είναι γνωστός ο όγκος V που εξορύχθηκε σε κάθε διάτρημα όπως και το βάθος τοποθέτησης εκρηκτικού (d_b) (Kewei Liu, 2018).

Γνωρίζοντας το κρίσιμο βάθος (d_c) και το βάρος της εκρηκτικής ύλης (W_c) που είναι σταθερά, το βάθος (d_b) και τον όγκο V για κάθε διάτρημα μπορεί να δημιουργηθεί το γράφημα $V/Q - \Delta$ (Σχήμα 2.3). Στο Σχήμα 2.3 παρουσιάζεται ένα γράφημα με τον y άξονα να αντιπροσωπεύει τον λόγο V/Q (m^3/kg) ενώ ο x άξονας αντιπροσωπεύει τον λόγο d_b/d_c . Ο λόγος d_b/d_c συμβολίζεται με Δ , είναι αδιάστατος και συγκρίνει οποιαδήποτε τιμή βάθους τοποθέτησης εκρηκτικού (d_b) με το κρίσιμο βάθος (d_c) (Kewei Liu, 2018). Μεγάλη τιμή του λόγου Δ σημαίνει ότι το βάθος τοποθέτησης προσεγγίζει το κρίσιμο βάθος με αποτέλεσμα να προκύπτει με δυσκολία ένας κρατήρας ή και να μην προκύπτει καθόλου με την εμφάνιση μόνο μερικών ρωγμών στο έδαφος. Μικρή τιμή του λόγου Δ σημαίνει ότι το βάθος τοποθέτησης είναι κοντά σχετικά στην επιφάνεια με αποτέλεσμα την δημιουργία κρατήρα. Όσο πιο μικρή η τιμή Δ τόσο πιο καλός θα είναι ο κρατήρας χωρίς όμως αυτό να σημαίνει ότι εξυπηρετεί τις ανάγκες μιας ασφαλούς και οικονομικής εξόρυξης, όπως έχει αναλυθεί παραπάνω στην ίδια υποενότητα.

Στο γράφημα όπου έχουν εισαχθεί οι τιμές για το κάθε διάτρημα, εφαρμόζει μια καμπύλη (στην προκειμένη περίπτωση η καμπύλη ακολουθεί την κατανομή Weibull) με την βοήθεια της οποίας βρίσκεται η ιδανική τιμή Δ η οποία συμβολίζεται με Δ_0 . Πρόκειται για την μέγιστη τιμή της καμπύλης στον άξονα y και υποδεικνύει ότι με την συγκεκριμένη σχέση d_b/d_c θα παραληφθεί όσο το δυνατόν περισσότερο θραυσμένο πέτρωμα γίνεται για την δεδομένη ποσότητα εκρηκτικής ύλης. Πλέον, με την εύρεση του Δ_0 είναι εφικτή η εύρεση του βέλτιστου βάθους τοποθέτησης εκρηκτικού και αυτό συμβολίζεται με d_0 .

Σχήμα 2.3: Γράφημα V/Q με Δ (Kewei Liu, 2018)

Σύμφωνα με τον [Αγιουντάντη \(2019\)](#), με την βέλτιστη απόδοση της έκρηξης μπορεί να επιτευχθεί το ανώτατο όριο της περιοχής θραύσης, το οποίο αντιστοιχεί με το βέλτιστο βάρος εκρηκτικής ύλης και μέσω αυτού, μπορεί να υπολογιστεί το βέλτιστο βάθος σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση :

$$d_0 = \Delta_0 \cdot E \cdot \sqrt[3]{W_0} \quad (2.2)$$

Όπου :

- d_0 = Η βέλτιστη απόσταση (βάθος) της επιφάνειας από το κέντρο μάζας της γόμωσης (ft)
- Δ_0 = Ο λόγος του βάθους εκρηκτικού (φορτίο) προς το κρίσιμο βάθος
- E = Ο συντελεστής ενέργειας παραμόρφωσης
- W_0 = Το βέλτιστο βάρος του εκρηκτικού (lb)

Εφόσον βρέθηκε το βέλτιστο βάθος, το επόμενο βήμα είναι η επαλήθευση των αποτελεσμάτων των δοκιμών μικρής κλίμακας και η εφαρμογή της μεθόδου σε κλίμακα παραγωγής. Γνωρίζοντας ως σταθερά τον συντελεστή ενέργειας παραμόρφωσης E και θέτοντας νέα ποσότητα εκρηκτικής ύλης που θα χρησιμοποιηθεί, θα βρεθεί μέσω της εξ. (2.1) το νέο κρίσιμο βάθος d_c . Εν συνεχεία, γνωρίζοντας το Δ_0 υπολογίζεται μέσω της

εξίσωσης (2.2) το νέο βέλτιστο βάθος d_0 και καθορίζονται οι διαστάσεις του κάναβου ανατίναξης. Εν τέλει, προκύπτει το μήκος προχώρησης το οποίο εξαρτάται από το d_0 και της ιδιότητες του πετρώματος.

2.1.3 Η παρουσία της μεθόδου VCR στον μεταλλευτικό κόσμο

Η μέθοδος VCR αρχικά εφαρμόστηκε στο μεταλλείο Levack του λεκανοπέδιου Sudbury στον Καναδά με σκοπό την ανάκτηση των στύλων υποστήριξης της μεθόδου που είχε ήδη εφαρμοστεί. Η εφαρμογή της αφού στέφθηκε με απόλυτη επιτυχία εφαρμόστηκε σε περισσότερα μεταλλεία του Sudbury όπως το Creighton mine που αποτελεί το βαθύτερο μεταλλείο εφαρμογής VCR παγκοσμίως, το Strathcona Mine, το Copper Cliff North mine και πολλά ακόμα που παρατίθενται στον Πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.2: Μεταλλεία του λεκανοπεδίου Sudbury που εφαρμόζουν την μέθοδο VCR (Hustrulid, 2001)

| Μεταλλείο | Ρυθμός εξόρυξης (τόνοι/ημέρα) | Βάθος εκμετάλλευσης (m) | Είδος λιθογώμωσης | Παρατηρήσεις |
|--------------------|-------------------------------|-------------------------|--|--|
| Copper Cliff North | 2960 | 1220 | Αδρανή σκωρίας με λάσπη τσιμέντου | Εκμετάλλευση 100% με VCR |
| Copper Cliff South | 5100 | 1220 | Μίγμα τσιμέντου, τελμάτων εμπλουτισμού και αδρανών | Πειραματική τεχνολογία mucking 100% VCR |
| Creighton mine | 9700 | 2130 | Μίγμα τσιμέντου και τελμάτων εμπλουτισμού | Βαθύτερο μεταλλείο με VCR στον κόσμο |
| Crean Hill | 2200 | 1200 | Υψηλής πυκνότητας μίγμα άμμου με τσιμέντο | Το πρώτο «ηλεκτρικό» μεταλλείο στον Καναδά |
| Stobie | 11300 | 1190 | Μίγμα τσιμέντου και τελμάτων εμπλουτισμού | Μεγαλύτερος ρυθμός εξόρυξης στο Sudbury |
| Little Stobie | 4600 | 730 | Μίγμα τσιμέντου, τελμάτων εμπλουτισμού και αδρανών | Παραγωγικότητα 22 τόνων/βάρδια |
| McCready West | 3300 | 490 | Αλλουβιακή άμμος με τσιμέντο | - |
| Levack | 4300 | 1160 | Αλλουβιακή λιθογώμωση με τσιμέντο | Το πρώτο μεταλλείο που εφάρμοσε την VCR |
| Lower Coleman | 3000 | 1050 | Μίγμα τσιμέντου και τελμάτων εμπλουτισμού | Πλήρως ηλεκτρικό μεταλλείο |
| Garson | - | 1560 | Μίγμα τσιμέντου και τελμάτων εμπλουτισμού | Σε παύση λόγω διαρρήξεων (rockbursts) |
| Strathcona | 2000 | 1400 | Μίγμα τσιμέντου και τελμάτων εμπλουτισμού | Ανάκτηση στύλων με VCR |

| | | | | |
|----------|------|------|--|----------|
| Lockerby | 2500 | 1500 | Μίγμα τσιμέντου και τελμάτων ε-μπλουτισμού | 100% VCR |
|----------|------|------|--|----------|

Η μέθοδος αργότερα εφαρμόστηκε συνδυαστικά αλλά και ως αυτόνομη μέθοδος εκμετάλλευσης σε διάφορα μεταλλεία ανά τον κόσμο όπως στην Αμερική, την Ευρώπη και την Αυστραλία. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι το μεταλλείο El Savador της Χιλής, το Rubiales mine της Ισπανίας, το Abminco mine της Αυστραλίας και το Homestake mine της Αμερικής. Σήμερα, το 75% της μεταλλευτικής δραστηριότητας στο Sudbury οφείλεται στην μέθοδο VCR καθώς, η παραγωγή ανά βάρδια χαλκού και νικελίου με την χρήση της μεθόδου VCR έχει αυξηθεί κατά 80% σε σχέση με της υπόλοιπες μεθόδους (Trotter, 1991).

2.1.4 Έργα προσπέλασης

Σε κάθε υπόγεια μέθοδο εκμετάλλευσης, συμπεριλαμβανομένου και της μεθόδου VCR, για να υπάρξει μια αρχική πρόσβαση στο περιβάλλον του κοιτάσματος, επιβάλλεται η κατασκευή μόνιμων έργων προσπέλασης. Τα έργα αυτά χωρίζονται σε 4 κατηγορίες:

- Τα φρέατα
- Τις κεκλιμένες στοές
- Τις ελικοειδείς ράμπες
- Τον συνδυασμό των παραπάνω

Η κατασκευή ενός έργου προσπέλασης κοιτάσματος προϋποθέτει την εκ των προτέρων μελέτη των διαστάσεων των έργων προσπέλασης, την θέση και την μορφή αυτών. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, η επιλογή ενός κατάλληλου έργου προσπέλασης είναι ένα πολυπαραγοντικό πρόβλημα που χρήζει μεγάλης προσοχής.

Η θέση και η μορφή του κατάλληλου έργου εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες με τους κυριότερους να είναι:

- Το τοπογραφικό ανάγλυφο και η γεωλογική δομή της περιοχής
- Η γεωμετρία του κοιτάσματος (ιδιαίτερα η κλίση)
- Το κόστος κατασκευής των έργων
- Το βάθος εκμετάλλευσης
- Η μέθοδος που εφαρμόζεται

Ταυτόχρονα, οι διαστάσεις των έργων αυτών εξαρτώνται κυρίως από την απαιτούμενη παραγωγή μεταλλεύματος και φυσικά από το μέγεθος των μηχανημάτων που θα χρησιμοποιηθούν για τις εργασίες εντός του κοιτάσματος (Οικονομόπουλος, 1989).

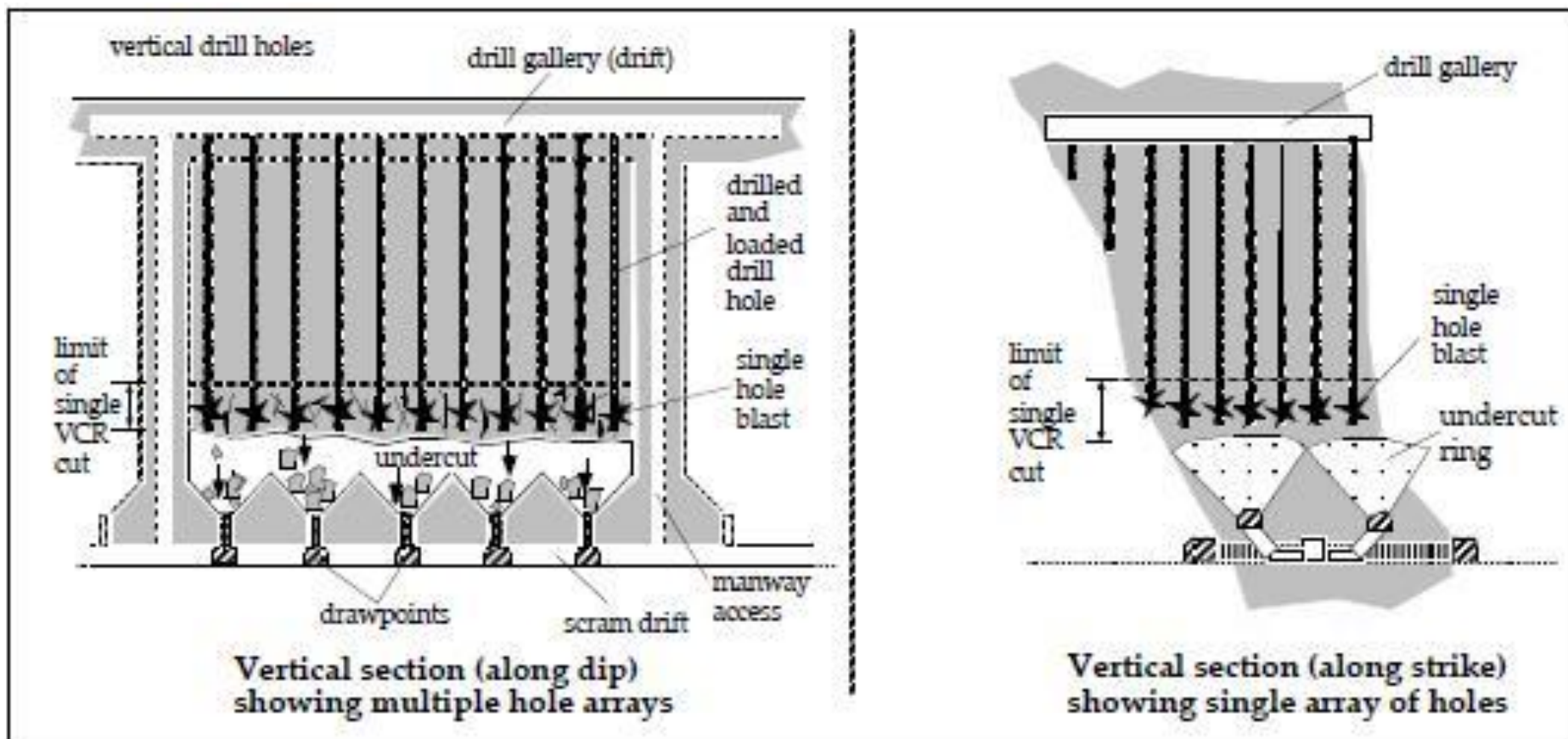
Σε όλα τα υπόγεια μεταλλεία επιβάλλεται να υπάρχουν δύο έξοδοι – επαφές με την επιφάνεια και αυτό συνεπάγεται την κατασκευή τουλάχιστον δύο βασικών έργων προσπέλασης. Με αυτόν τον τρόπο διασφαλίζεται η σίγουρη διαφυγή των εργαζομένων σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης, αλλά ταυτόχρονα διαμοιράζεται ο φόρτος εργασίας και εξυπηρετούνται οι ανάγκες αερισμού των μετώπων. Τα έργα προσπέλασης κατά κανόνα κατασκευάζονται από την μεριά του δαπέδου και θα χρησιμοποιηθούν για όλη την διάρκεια ζωής του μεταλλείου, κρίνοντας απαραίτητη την κατάλληλη υποστήριξη αλλά και την περιοδική συντήρηση, ώστε να διασφαλίζεται η εύρυθμη και καλή λειτουργία του μεταλλείου. Περισσότερες λεπτομέρειες για την επιλογή των έργων προσπέλασης στο σχέδιο της διπλωματικής της θα αναφερθούν στην υποενότητα 3.2.1.

2.1.5 Έργα προπαρασκευής μεθόδου VCR

Τα έργα προπαρασκευής είναι η επόμενη σειρά έργων που ακολουθεί μετά από αυτά της προσπέλασης και, αφορά τα έργα που ουσιαστικά οριοθετούν το κοίτασμα και το διαιρούν σε πάνελ ή και ορόφους κατάλληλων διαστάσεων για εξόρυξη μετώπων. Τα έργα αυτά συνήθως είναι κεκλιμένα, διευθυντικές στοές και εγκάρσιες στοές εντός ή και εκτός του κοιτάσματος. Τα προαναφερθέντα έργα μπορούν να συνοδεύουν τα λούκια, μικρά καμινέτα αερισμού, και κύριες στοές μεταφοράς. Στην μέθοδο VCR, απαιτούνται ελάχιστα έργα προπαρασκευής, μόλις τρεις βασικές στοές (επίπεδα) εντός του κοιτάσματος, με την κάθε μια να κατέχει σημαντικό ρόλο κατά την διαδικασία εκμετάλλευσης σε ένα μέτωπο.

Αρχικά, από την διευθυντική στοά που βρίσκεται σε κατάλληλο ύψος (εκτός του κοιτάσματος), διανοίγεται μια κατώτερη κύρια στοά εντός του κοιτάσματος στην οποία γίνεται αποκομιδή του μεταλλεύματος, αποτελεί δηλαδή το επίπεδο αποκομιδής. Η στοά υποσκαφής διαδέχεται την στοά αποκομιδής, και κατασκευάζεται τουλάχιστον 5-15 μέτρα πάνω από την οροφή της δεύτερης. Η στοά υποσκαφής χρησιμεύει αφενός στην δημιουργία ελεύθερης επιφάνειας για την επιτυχή ανατίναξη και αφετέρου στην όρυξη χοανών κατάλληλων διαστάσεων οι οποίες θα επικοινωνούν με την κατώτερη στοά αποκομιδής και θα διανείμουν ομοιόμορφα το θραυσμένο υλικό σε αυτήν. Εν τέλει, το τελευταίο επίπεδο που θα κατασκευαστεί, είναι η ανώτερη κύρια στοά, η οποία χρησιμεύει

στην δημιουργία κατακόρυφων διατρημάτων που καταλήγουν στην οροφή της υποσκαφής (Σχήμα 2.4).



Σχήμα 2.4: Άποψη παραγωγής σε μέτωπο της VCR (<https://minewiki.engineering.queensu.ca>)

Η στοά αυτή θα έχει ισχυρή υποστήριξη καθώς θα υπάρχουν εργαζόμενοι σε αυτό. Η υποστήριξη περιλαμβάνει ένα πλέγμα σύρματος το οποίο καλύπτει όλη την οροφή σε συνδυασμό με αγκύρια. Το περίβλημα της στοάς θα έχει άσπρη βαφή ώστε να ενισχυθεί η φωτεινότητα εντός της. Η ανώτερη στοά αποτελεί το επίπεδο διατηρημάτων με απόσταση από 50 m έως και 100 m από την υποσκαφή και συμπληρώνει το σύνολο των βασικών έργων προπαρασκευής σε ένα εξορυσσόμενο μέτωπο της μεθόδου VCR (Hustrulid, 2001). Το πλάτος όλων των στοών προσαρμόζεται στο πλάτος του στύλου που θα εξορυχθεί και αυτό μπορεί να είναι από 9 έως και 15 μέτρα (Trotter, 1991).

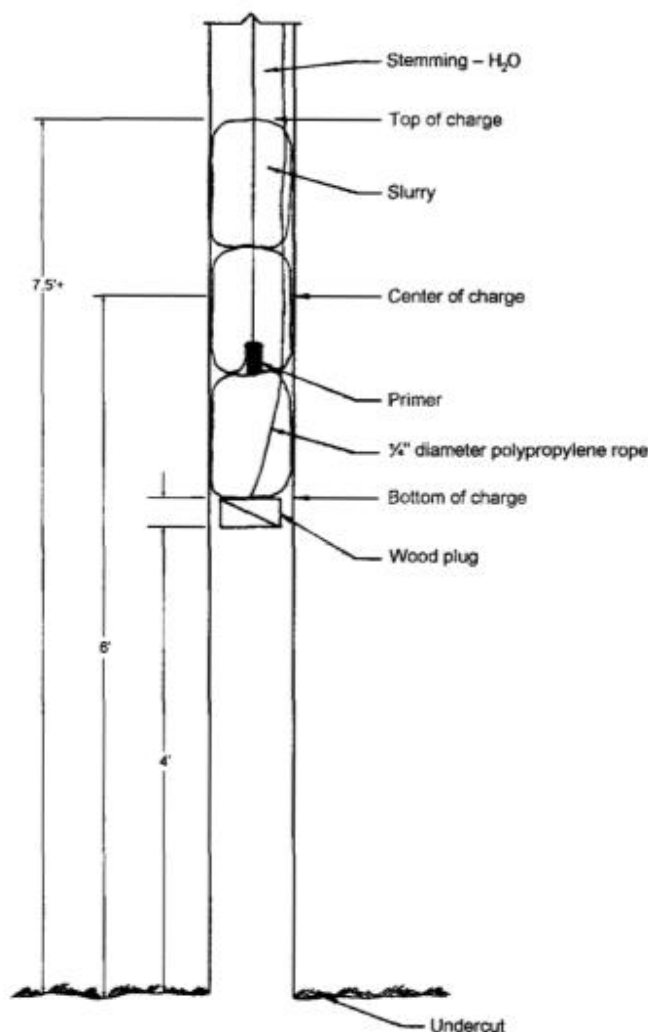
2.1.6 Έργα ανάπτυξης μεθόδου VCR

Εφόσον τα έργα προπαρασκευής έχουν ολοκληρωθεί, μπορούν να εφαρμοστούν τα έργα ανάπτυξης και να αρχίσει η διαδικασία παραγωγής. Σε αυτά περιλαμβάνονται τα κατακόρυφα διατρήματα 165 mm τα οποία γίνονται σε κানাβο ο οποίος μπορεί να έχει διαστάσεις 1.5 m x 1.5 m έως και 4 m x 4 m. Το ύψος των διατηρημάτων, όπως προαναφέρθηκε, ταυτίζεται με την διαφορά ύψους της στοάς υποσκαφής και ανώτερης στοάς και περιορίζεται κυρίως από την ικανότητα διάτρησης του διατηρητικού μηχανήματος που έχει επιλεγεί. Τα διατηρητικά DTH είναι τα ευρέως χρησιμοποιούμενα και το σφάλμα διάτρησης αν δεν έχει δοθεί ακριβώς από τον κατασκευαστή κυμαίνεται περίπου σε 3% (Εξαδάκτυλος, 2005).

Συνεπώς, είναι σημαντικό να χρησιμοποιηθεί κατάλληλος κানাβος ο οποίος να έχει προβλέψει το σφάλμα αυτό να μην επηρεάζει την γόμωση στο μέτωπο άλλα και ταυτόχρονα να μην βλάψουν οι εκρήξεις το περιβάλλον πέτρωμα. Η μέθοδος VCR είναι ιδιαίτερη για πολλούς λόγους και ένας από αυτούς είναι ότι δεν επηρεάζεται το περιβάλλον πέτρωμα από τις ανατινάξεις, με σκοπό την διατήρηση της στατικής ισορροπίας του μετώπου αλλά και τον περιορισμό της αραίωσης του μεταλλεύματος.

Μόλις τα διατρήματα στην μέθοδο VCR ορυχθούν πλήρως, υπολογίζεται το ύψος τους και ελέγχονται για τυχόν αστοχίες σε όλο το μήκος τους με χρήση ειδικής κάμερας. Εφόσον ο έλεγχος ολοκληρωθεί, μπορεί να αρχίσει η διαδικασία γόμωσης. Αρχικά, τοποθετείται μια ξύλινη τάπα η οποία καλύπτει το κενό που υπάρχει από την γόμωση μέχρι την οροφή της ελεύθερης επιφάνειας. Ύστερα, ακολουθεί η γόμωση είτε με ANFO (συχνή επιλογή λόγω μικρού κόστους) είτε με γαλακτώματα αναλόγως την περίπτωση, με μέγιστο μήκος γόμωσης έξι φορές την διάμετρο του διατρήματος και σε συγκεκριμένο

βάθος ανάλογα το αποτέλεσμα του υπολογισμού της εξ (2.2). Η επιγύμωση αποτελείται είτε από μια ποσότητα νερού είτε από αδρανή υλικά και τοποθετείται τελευταία με μήκος 4 – 5 μέτρα, αφού έχει τοποθετηθεί και το κατάλληλο μέσο έναυσης, ώστε να αποτραπεί η εκτόνωση των εκρηκτικών προς τα πάνω (Σχήμα 2.5). Οι πυροδότες που χρησιμοποιούνται είναι είτε ηλεκτρικοί είτε μη ηλεκτρικοί (nonel) και οι τελευταίοι προτιμώνται περισσότερο (Trotter, 1991).

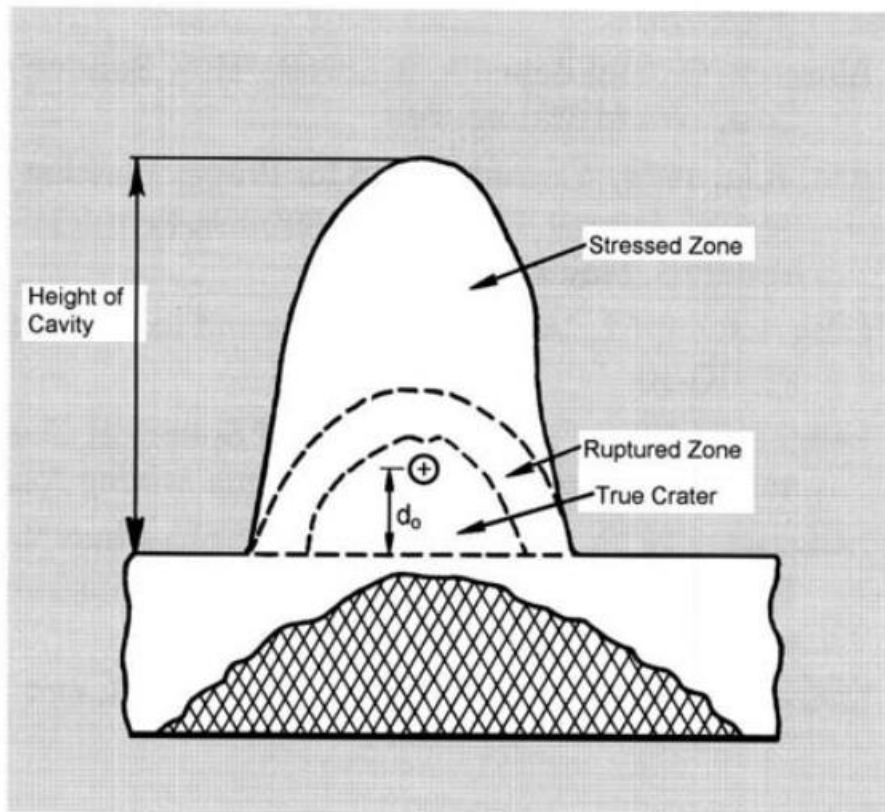


Σχήμα 2.5: Τρόπος γύμωσης ενός διατρήματος στην μέθοδο VCR (Gertch & Bullock, 1998).

2.1.7 Τρόπος εφαρμογής της μεθόδου VCR

Εφόσον όλα τα κατάλληλα έργα έχουν ολοκληρωθεί, είναι δυνατό να εκκινήσει η διαδικασία εξόρυξης ενός μετώπου. Πρώτο μέλημα βέβαια είναι να υπολογιστεί με την

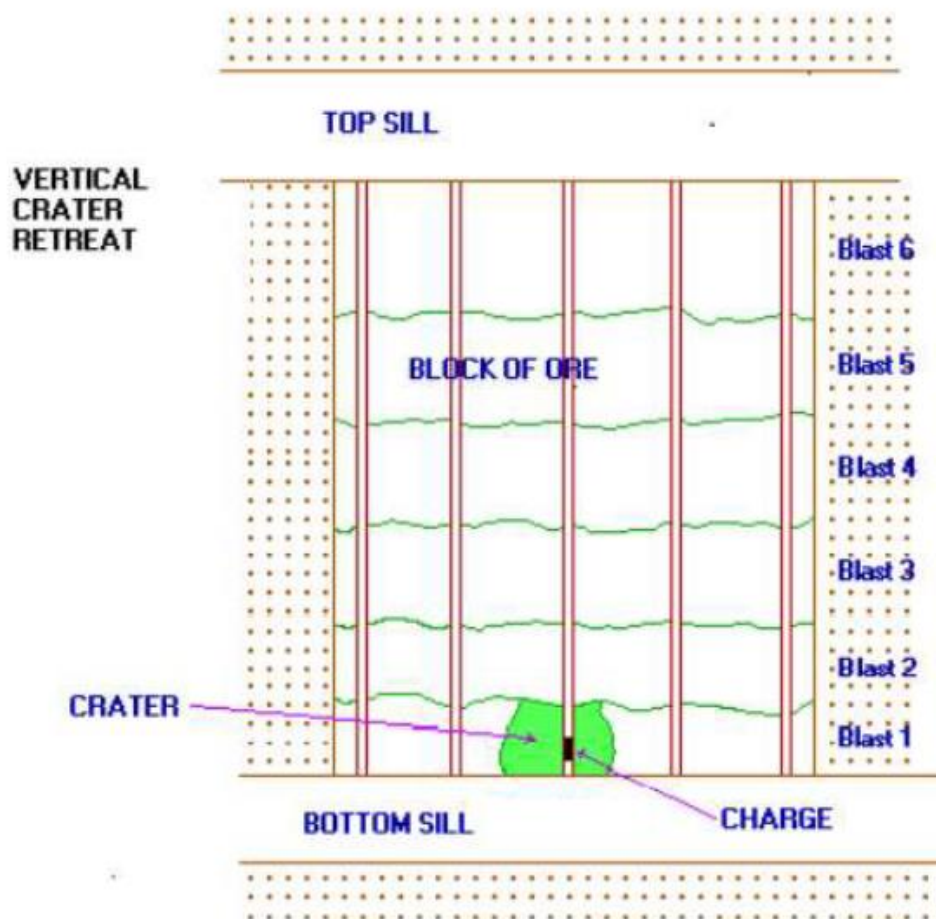
εξ. (2.2) το ύψος από το οποίο θα απέχουν οι γομώσεις των διατρημάτων από την ελεύθερη επιφάνεια της υποσκαφής. Είναι υψίστης σημασίας να γίνει όσο το δυνατό πιο ακριβής υπολογισμός, με σκοπό να δημιουργηθεί ένας κατάλληλος ανάστροφος κρατήρας όπως περιεγράφηκε εκτενώς στην [ενότητα 2.1.2](#) (Σχήμα 2.6). Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η προχώρηση της ανατίναξης μπορεί να μην ταυτίζεται απαραίτητα με την ελάχιστη τιμή που ισούται με το άθροισμα του βέλτιστου βάθους και του ήμισεως του μήκους γόμωσης του διατρήματος. Στο [Σχήμα 2.6](#) παρουσιάζεται ένας ανάστροφος κρατήρας όπου το βάθος του υπερβαίνει σημαντικά το βέλτιστο βάθος d_0 . Ανάλογα τις ιδιότητες του μητρικού πετρώματος, το μήκος προχώρησης (δηλαδή το βάθος του κρατήρα) μπορεί να υπερβαίνει το προαναφερθέν άθροισμα κατά πολύ ([Gertch & Bullock, 1998](#)). Ισχύει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η προχώρηση, τόσο το καλύτερο καθώς θα εξοικονομείται ποσότητα εκρηκτικού και θα είναι πιο γρήγορη η εξόρυξη.



Σχήμα 2.6: Άποψη ενός ανάστροφου κρατήρα μετά την ανατίναξη ενός υπόνομου ([Gertch & Bullock, 1998](#)).

Ταυτόχρονα, είναι προφανές ότι δεν είναι εφικτό να ανατιναχθεί ένα ολόκληρο μέτωπο μονομιάς, άλλωστε δεν είναι και ο σκοπός της μεθόδου. Η μέθοδος λειτουργεί με την δημιουργία ανάστροφων κρατήρων σε κάθε διάτρημα με σκοπό να υπάρχει όσο το δυνατόν μικρότερη αραίωση και μεγαλύτερος όγκος θραυσμένου πετρώματος. Συνεπώς, οι ανατινάξεις γίνονται σε οριζόντια τμήματα (βήματα) με ορισμένο ύψος. Έχοντας

γνώση λοιπόν του βέλτιστου ύψους που θα απέχουν οι γομώσεις από την υποσκαφή καθώς και το ύψος του μετώπου (την διαφορά ύψους ανώτερης στοάς με υποσκαφή), δύναται να υπολογιστεί προσεγγιστικά το μήκος προχώρησης ανά ανατίναξη και εν τέλει το σύνολο των ανατινάξεων τμημάτων που θα γίνουν με σκοπό την πλήρη εξόρυξη του μετώπου (Σχήμα 2.7).

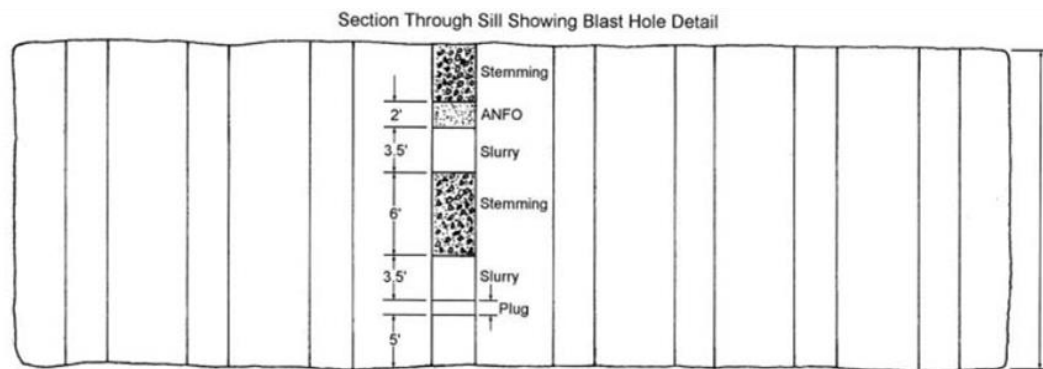


Σχήμα 2.7 Αναπαράσταση τμημάτων ανατινάξεων σε ένα μέτωπο
(<http://digistar.mb.ca/minsci/ug/vbm/vcr.htm>)

Η ανατίναξη των υπονόμων μπορεί να εκκινήσει από την ανώτερη κύρια στοά και από τα περιμετρικά διατρήματα προς τα μέσα είτε από το μέσον του κάναβου προς τις άκρες του. Αξίζει να αναφερθεί ότι στην περίπτωση που υπάρχουν κεκλιμένες στοές εντός των στύλων προστασίας που θα ανακτηθούν με την μέθοδο, τότε αυτές μπορούν να εκμεταλλευθούν ως επιπλέον ελεύθερη επιφάνεια. Η ανατίναξη του τμήματος μπορεί να εκκινήσει από τα διατρήματα που βρίσκονται δίπλα σε αυτές. Ο αριθμός των υπονόμων δεν επηρεάζει τον αριθμό των ανατινάξεων που θα χρησιμοποιηθούν σε ένα τμήμα.

Παρόλα αυτά, σε περίπτωση που το μήκος του κάναβου είναι αρκετά μεγάλο, είναι επι-
κτό να γίνουν παραπάνω από μια ανατίναξεις. Η ανατίναξη, θραύει το υλικό και μέσω
της βαρύτητας αυτό οδηγείται στις χοάνες και από εκείνες στην στοά αποκομιδής.

Η καθυστέρηση των ανατινάξεων μεταξύ των διατρημάτων είναι συνήθως της
τάξεως των 25 msec (Trotter, 1991). Η ανατίναξη ολόκληρου του μετώπου γίνεται σε
στάδια από κάτω προς τα πάνω και το κάθε τμήμα διαδέχεται την ανατίναξη του άλλου
μέχρι να απομείνουν 9 - 10 μέτρα υλικού τα οποία βρίσκονται ακριβώς κάτω από το
επίπεδο διατρημάτων και αποτελούν υποστήριξη για αυτό υπό μορφή οριζόντιου στύλου
(πατώματος). Για λόγους ασφαλείας, αν και ο στύλος αυτός αντιστοιχεί σε 2 - 3 τμήματα,
εξορύσσεται με χρήση διπλής γόμωσης σε μια ανατίναξη (Σχήμα 2.8).



Σχήμα 2.8: Τομή γομωμένου διατρήματος για την απόληψη του στύλου προστασίας κάτω από το επίπεδο δια-
τρημάτων (Gertch & Bullock, 1998).

Η ανατίναξη με διπλή γόμωση αν και φαίνεται ελκυστική, δεν χρησιμοποιείται
παρά μόνο στην προαναφερθείσα περίπτωση, καθώς υπάρχει κίνδυνος ανάφλεξης σκό-
νης σουλφιδίων (Trotter, 1991). Η πλήρης εξόρυξη ενός μετώπου αφήνει ένα κενό το
οποίο υπάρχει η δυνατότητα να λιθογομωθεί, αλλά δεν είναι απαραίτητο πάντα. Στην
περίπτωση που χρησιμοποιηθεί λιθογόμωση για την πλήρωση των κενών, θα χρησιμο-
ποιηθεί αρχικά ένα μίγμα άμμου και τσιμέντου (με περιεκτικότητα 6% τσιμέντου) για
την πλήρωση του συνόλου των στοών αποκομιδής και χοανών. Η πλήρωση του υπόλοι-
που κενού θα γίνει με ένα μίγμα άμμου και τσιμέντου (με περιεκτικότητα 2% - 3% τσι-
μέντου) (Trotter, 1991).

Η αντοχή της λιθογόμωσης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες με κυριότερο την
ποσότητα του νερού στο μίγμα. Οι τιμές αντοχής σε μονοαξονική θλίψη κυμαίνονται από
200 kPa έως 400 kPa για μίγμα περιεκτικότητας 2% - 3% τσιμέντου και ύπαρξη υγρασίας
30%. Το νερό είναι το μεγαλύτερο πρόβλημα κατά την εφαρμογή της λιθογόμωσης κα-
θώς θα διεισδύσει και θα απεγκλωβιστεί από το σώμα της. Συνεπώς, το σφράγισμα της

στοάς αποκομιδής με ένα διάφραγμα ώστε να συγκρατηθεί η λιθογόμωση εντός του μετώπου και η πρόβλεψη εγκαταστάσεων αποστράγγισης υδάτων είναι σημαντικές προαπαιτούμενες ενέργειες. (Trotter, 1991). Η λιθογόμωση απαιτεί ένα ικανό χρονικό διάστημα ώστε να στερεοποιηθεί και να αποκτήσει τις μηχανικές αντοχές της. Η εκμετάλλευση θα συνεχιστεί σε επόμενο μέτωπο που δεν έχει άμεση επαφή με το προσφάτως λιθογομωμένο.

2.1.8 Προϋποθέσεις εφαρμογής της μεθόδου VCR

Η μέθοδος ανεστραμμένου κρατήρα δεν είναι εφαρμόσιμη σε κάθε λογής κοίτασμα. Υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί που δεν μπορούν να αγνοηθούν καθώς αφορούν την φύση του κοιτάσματος. Οποιαδήποτε απόκλιση από τον κανόνα καθιστά την μέθοδο δυσλειτουργική και αντισυμβατική αν όχι εφαρμόσιμη.

Όσον αφορά τις μηχανικές αντοχές του μεταλλεύματος, αυτές πρέπει να είναι υψηλές με τιμή RMR > 50 (Εξαδάκτυλος, 2005). Ο περιορισμός αυτός, αφορά την καλή αυτό-υποστήριξη του μετώπου κατά την σταδιακή του εξόρυξη με την χρήση εκρηκτικών. Τα τμήματα που δεν έχουν εξορυχθεί δηλαδή, θα πρέπει, να μείνουν αλώβητα μετά από μια ανατίναξη και να μην συμβεί μια ξαφνική κατακρήμνιση όλου του εναπομείναντος υλικού στην στοά αποκομιδής. Άλλωστε, για να δικαιολογηθεί και εξαρχής η χρήση των εκρηκτικών, το μητρικό πέτρωμα πρέπει να είναι συνεκτικό και να μην δύναται να εξορυχθεί με την χρήση μηχανικών μέσων.

Επιπλέον, το περιβάλλον πέτρωμα θα πρέπει να έχει όσο το δυνατό υψηλές μηχανικές αντοχές (Εξαδάκτυλος, 2005). Η συνθήκη που αναφέρθηκε παραπάνω για το εναπομένον υλικό, ισχύει και για το περιβάλλον πέτρωμα. Είναι κρίσιμο, το κενό που δημιουργείται μέσα στον θάλαμο εκμετάλλευσης από τις ανατινάξεις των τμημάτων της VCR, να μην υποστεί κάποια διάρρηξη (Rockburst) στην πλευρική υποστήριξη (λιθογόμωση, περιβάλλον πέτρωμα). Η αραίωση του εξορυχθέντος υλικού θα είναι η ανώδυνη συνέπεια σε περίπτωση που συμβεί το παραπάνω γεγονός, με την πλήρη κατάρρευση του μετώπου να αποτελεί ένα καταστροφικό αποτέλεσμα.

Ένας περιορισμός που αφορά την γεωμετρική φύση του κοιτάσματος είναι η υψηλή κλίση του. Οι τιμές κλίσης από 70° έως 90° μοίρες είναι ιδανικές για την ανάπτυξη των έργων προπαρασκευής και ανάπτυξης της μεθόδου VCR. Ταυτόχρονα, το κοίτασμα είναι ιδανικό να διαθέτει μεγάλη έκταση στην κατακόρυφη διάσταση (Εξαδάκτυλος, 2005). Η μέθοδος VCR γενικά απευθύνεται σε κοιτάσματα με πολλούς ορόφους και όχι επίπεδα κοιτάσματα.

Εν τέλει, όπως και σε κάθε μέθοδο, το κοίτασμα όσο πιο ομαλά γεωμετρικά χαρακτηριστικά έχει, τόσο πιο εύκολα μπορεί να προσαρμοστεί και η μέθοδος εκμετάλλευσης (Εξαδάκτυλος, 2005). Τα κοιτάσματα που έχουν απότομες μεταβολές του σχήματος τους (αυξομειώσεις στην μέση διάσταση τους) δυσχεραίνουν τον αποτελεσματικό σχεδιασμό των έργων προπαρασκευής και ανάπτυξης και αυξάνουν την αραίωση και τον χρόνο εκμετάλλευσης.

2.1.9 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου VCR

Η μέθοδος VCR, από την στιγμή που επινοήθηκε, παρουσίασε μια σειρά από πλεονεκτήματα από πολλές απόψεις. Όπως όλες οι μέθοδοι, η VCR έχει και μειονεκτήματα, τα οποία όμως είναι ελάχιστης σημασίας για την επιτυχή εφαρμογή της σε πολλές περιπτώσεις εκμεταλλεύσεων.

Στα πλεονεκτήματα της μεθόδου συγκαταλέγονται τα εξής (Εξαδάκτυλος, 2005; Trotter, 1991; Metallurgy, 1991):

- Καλή θρυμματοποίηση υλικού, η οποία αυξάνει την παραγωγικότητα και μειώνει τις ανάγκες δευτερογενούς θραύσης του μεταλλεύματος.
- Ελάχιστη πιθανότητα φθοράς των παρυφών του κοιτάσματος.
- Μεγιστοποίηση της ευστάθειας των παρυφών του κοιτάσματος.
- Ελαχιστοποίηση της αραίωσης του μεταλλεύματος.
- Εύκολος χειρισμός και ακριβής πρόβλεψη προόδου των ανατινάξεων.
- Υψηλή παραγωγικότητα με λιγότερα μέτωπα.
- Μικρός αριθμός ανθρώπινου δυναμικού (μειωμένο κόστος εκμετάλλευσης).
- Εκτός από συμπληρωματική (ανάκτηση στηλών υποστήριξης) έχει την δυνατότητα χρήσης και ως αυτόνομης.
- Καλές μηχανικές συνθήκες και ευστάθεια μετά το πέρας της εκμετάλλευσης των στοών ανάπτυξης.
- Δεν υπάρχουν νεκροί χρόνοι (πάντα υπάρχουν εργασίες που δεν δεσμεύονται χρονικά από άλλες).

Σε γενικές γραμμές η μέθοδος VCR θεωρείται μια αρκετά ασφαλής μέθοδος, αφενός γιατί το ανθρώπινο δυναμικό ελάχιστα επεμβαίνει στο έργο της εκμετάλλευσης και αφετέρου η μέθοδος εφαρμόζεται σε περιβάλλον υψηλών μηχανικών αντοχών με επιπρόσθετη τεχνητή υποστήριξη. Επιπλέον, ελαχιστοποιεί το φαινόμενο συγκέντρωσης των τάσεων στο μέτωπο και στις στοές προσβολής καθώς και την πιθανότητα εμφάνισης

οποιοδήποτε τεχνικού σφάλματος, όπως το κλείσιμο των διατρημάτων (Metallurgy, 1991).

Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι (Εξαδάκτυλος, 2005; Hustrulid, 2001; Trotter, 1991) :

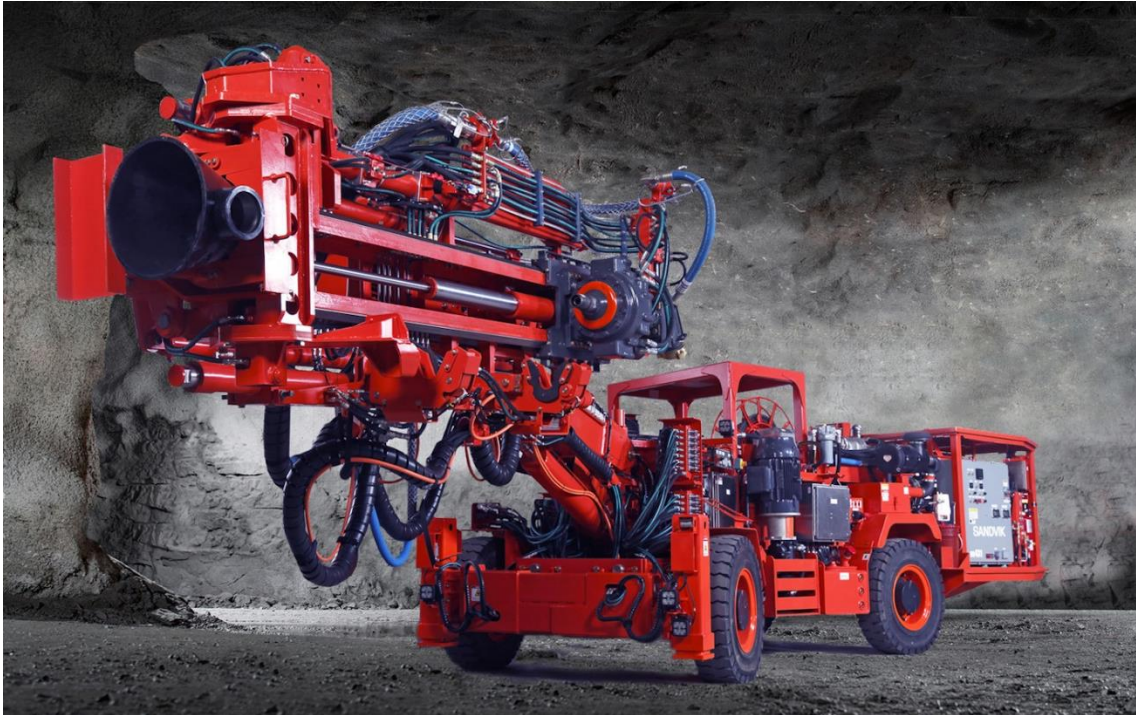
- Μικρός δείκτης διάτρησης (Τόνοι εξορυσσόμενου μεταλλεύματος ανά μέτρο διάτρησης).
- Μεγάλη κατανάλωση εκρηκτικής ύλης.
- Πιθανά σφάλματα (αντιμετώπισιμα με σύγχρονο εξοπλισμό) όσον αφορά την κλίση και την θέση των διατρημάτων.
- Πιθανή η παρέκκλιση των διατρημάτων μεγάλου μήκους λόγω κάμψης της διατρητικής στήλης.
- Απαιτείται εξειδικευμένο προσωπικό με μεγάλη εμπειρία στην διάτρηση και γόμωση σε μεγάλα βάθη.
- Υψηλό κόστος έργων ανάπτυξης.
- Μικρότερη ευελιξία στον βαθμό αποδέσμευσης.

Όπως γίνεται αντιληπτό, τα περισσότερα μειονεκτήματα της μεθόδου αφορούν σφάλματα τα οποία με κατάλληλο εξοπλισμό και έμπειρη ομάδα εργαζομένων μπορούν να περιοριστούν. Τα περισσότερα σφάλματα επιδρούν στην ποιότητα θραύσης του υλικού αλλά και στην πιθανότητα πρόκλησης ζημιών στο περιβάλλον πέτρωμα (ως αυτόνομη) ή της λιθογόμωσης υποστήριξης της προηγούμενης μεθόδου (για ανάκτηση στύλων). Η αντιμετώπιση τους συνιστά έμπειρη ομάδα μηχανικών και κατάλληλο εξοπλισμό.

Πιο συγκεκριμένα, με χρήση ενδοδιατρηματικών αερόσφυρων (DTH) και χρήση «πτερυγίων οδηγών» επί του κατώτερου τμήματος της διατρητικής στήλης, το σφάλμα κάμψης περιορίζεται στο ανεκτό 1%. Επιπλέον, με την προσθήκη λέιζερ ή και άλλων ειδικών οργάνων μπορεί να βελτιωθεί η ακρίβεια της διάτρησης (Εξαδάκτυλος, 2005).

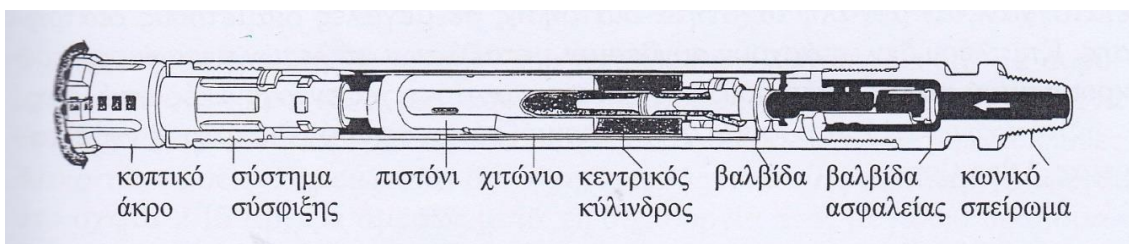
2.1.10 Εξοπλισμός εκμετάλλευσης της μεθόδου VCR

Η μέθοδος VCR είναι σχεδόν εξολοκλήρου μια μηχανοποιημένη μέθοδος. Η εφαρμογή της είναι αρκετά απλή και απαιτούνται συγκεκριμένα μηχανήματα που μπορούν να φέρουν εις πέρας το έργο της εκμετάλλευσης. Βασικό προαπαιτούμενο μηχανήμα είναι ένα μεγάλων διαστάσεων εφαρμογής διατρητικό DTH (Down-The-Hole) (Σχήμα 2.9).



Σχήμα 2.9: Διατρητικό μηχάνημα DTH DU - 431 της εταιρείας Sandvik (Sandvik Group, 2023).

Μια ενδοδιατρηματική σφύρα DTH είναι κρουστική σφύρα η οποία έχει ως αρχή λειτουργίας την παροχή πεπιεσμένου αέρα μέσω ενός διατρητικού στελέχους στην κοπτική κεφαλή. Η κεφαλή εξαναγκάζεται σε περιστροφική κίνηση και ταυτόχρονα πραγματοποιεί περίπου 1000 – 2000 κρούσεις ανά λεπτό ώστε να θραύσει το πέτρωμα και να ορυχθεί ένα διάτρημα (Σχήμα 2.10). Οι πιέσεις λειτουργίας της σφύρας κυμαίνονται από 6 bar έως 25 bar και χρησιμοποιείται μόνο για όρυξη μεσαίου έως μεγάλου διαμέτρου διατρήματα.



Σχήμα 2.10: Τμήματα κοπτικού άκρου ενδοδιατρηματικής σφύρας (Αγιουτάντης, 2019).

Διαθέτουν πολλά πλεονεκτήματα τα οποία εξυπηρετούν στις ανάγκες διάτρησης στην μέθοδο VCR (Αγιουτάντης, 2019):

- Δεν χρησιμοποιείται νερό για την απομάκρυνση του εξορυσσόμενου υλικού στο διάτρημα αλλά ο ίδιος πεπιεσμένος αέρας που εξαναγκάζει τη σφύρα σε λειτουργία.

- Αυξημένος χρόνος ζωής των διατρητικών στελεχών και των κοπτικών άκρων καθώς δεν υφίστανται ιδιαίτερες αξονικές τάσεις.
- Η ταχύτητα διάτρησης διατηρείται σταθερή κατά την αύξηση του βάθους καθώς δεν υπάρχουν ενεργειακές απώλειες.
- Μειωμένος θόρυβος λειτουργίας.
- Πολύ μικρή απόκλιση από την διεύθυνση διάτρησης καθώς δεν υπάρχει παλινδρόμηση της διατρητικής στήλης.

Στα μειονεκτήματα της ενδοδιατρηματικής σφύρας είναι ότι χρειάζεται προσοχή στην απομάκρυνση των θραυσμάτων, καθώς η συσσώρευση τους γύρω από την κοπτική κεφαλή ενδέχεται να προκαλέσει εμπλοκή κατά μήκος όλης της διατρητικής στήλης (Αγιουτάντης, 2019).

Τα διατρητικά μηχανήματα στην VCR μπορούν να λειτουργούν και εντελώς αυτόματα. Υπάρχει η δυνατότητα να εισάγει ο χειριστής την γωνία διάτρησης, την κλίση και το βάθος διάτρησης και το διατρητικό αναλαμβάνει αυτόνομα τις υπόλοιπες λειτουργίες. Η προσθήκη ή αφαίρεση διατρητικών στελεχών, η παρακολούθηση της προόδου διάτρησης μέσω αισθητήρων πίεσης, ροπής και θέσης είναι μερικές από τις λειτουργίες που ελέγχει εξολοκλήρου το μηχάνημα (Kelly & England, 1987). Στο Σχήμα 2.10 παρουσιάζεται το διατρητικό μηχάνημα της εταιρείας Sandvik, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί και στα πλαίσια του σχεδιασμού της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Το συγκεκριμένο μηχάνημα μπορεί να ορύξει σε βάθος έως και 100 m διατρήματα (μονά η παράλληλα) με διάμετρο που κυμαίνεται από 89 mm έως 203 mm. Οι διαστάσεις του είναι 2.6 m ύψος, 10.9 m μήκος και 2.3 m πλάτος. Διαθέτει συμπιεστή αέρα και εφοδιάζεται με κινητήρα πετρελαίου μέγιστης ιπποδύναμης 150 HP (Sandvik Group, 2023).

Η αποκομιδή του εξορυγμένου υλικού γίνεται με την χρήση φορτωτών LHD (Loading Hauling Dumping truck). Η σημερινή τεχνολογία επιτρέπει και την χρήση τέτοιων μηχανημάτων με αυτόματη λειτουργία μη επανδρωμένων φορτωτών. Το 1978 στο λεκανοπέδιο Sudbury, έγινε μια επιτυχημένη αποστολή ενός φορτωτή με χρήση τεχνολογίας ραδιοσυχνοτήτων για την ανάκτηση μεταλλεύματος από ένα επισφαλές σημείο ενός λιθογομωμένου μετώπου. Από τότε, έχουν εγκατασταθεί με επιτυχία σε πολλά μεταλλεία LHD με τηλεχειρισμό, έχοντας απορρίψει διάφορες ανασφάλειες όπως αν θα είναι δυνατή η ορατότητα του μηχανήματος στο μέτωπο από τον χειριστή. Ο χειρισμός είναι εφικτό να είναι και υβριδικός. Συνήθως η φόρτωση του μεταλλεύματος γίνεται με

απομακρυσμένο έλεγχο και η μεταφορά και απόθεση σε λούκια με χειροκίνητη λειτουργία. Εναλλακτικά σε περιπτώσεις όπου η απόσταση των λουκιών με το μέτωπο είναι αρκετά μεγάλη, δύναται να γίνει με τηλεχειρισμό η φόρτωση του μεταλλεύματος επί τόπου σε φορτηγά τα οποία θα μεταφέρουν το μετάλλευμα (Trotter, 1991).

Τα LHD δύναται να κινούνται και εξολοκλήρου με ηλεκτρισμό. Είναι δυνατό να είναι εφοδιασμένα με μπαταρία άλλα και να λαμβάνουν συνεχή τροφοδοσία από ηλεκτρικό δίκτυο μέσω ενός καλωδίου. Τα μοντέλα με μπαταρία έχουν αυξημένο κόστος αγοράς άλλα προσφέρουν πλήρη ελευθερία κινήσεων και εμβέλειας λειτουργίας ενώ δεν απαιτούν την ύπαρξη ηλεκτρικών εγκαταστάσεων για την λειτουργία τους σε αντίθεση με τα μοντέλα με ενσύρματη τροφοδοσία.

Το 1975 στο Creighton mine έγινε η πρώτη εφαρμογή ενός ηλεκτροκίνητου φορτωτή. Η επιτυχής εφαρμογή καθώς και τα πλεονεκτήματα που προσφέρει ώθησαν την περαιτέρω ανάπτυξη τέτοιων μηχανημάτων σε περισσότερα μέτωπα. Τα πλεονεκτήματα αυτά παρατίθενται παρακάτω (Trotter, 1991):

- Βελτιωμένη παραγωγικότητα
- Μειωμένα κόστη συντήρησης και λειτουργίας (η εμπειρία έχει δείξει ότι όσο μεγαλύτερο το μέγεθος του φορτωτή τόσο μικρότερο είναι το κόστος ανά τόνο εκμετάλλευσης)
- Ανύπαρκτη εκπομπή καυσαερίων
- Μειωμένος θόρυβος λειτουργίας
- Λιγότερη έκλυση θερμότητας στο περιβάλλον κατά την λειτουργία του φορτωτή

Στο Σχήμα 2.11 παρουσιάζεται ένας ηλεκτρικός φορτωτής με μπαταρία, της εταιρείας Epiroc ο οποίος θα χρησιμοποιηθεί και στα πλαίσια των σχεδίων της παρούσας εργασίας.



Σχήμα 2.11: Ο φορτωτής Scooptram ST14 SG της εταιρείας Epiroc (Epiroc, 2023).

Ο φορτωτής Scooptram ST14 SG έχει την δυνατότητα μεταφοράς 14 μετρικών τόνων υλικού. Έχει καθαρό βάρος 42 τόνων και φέρει ηλεκτρικό κινητήρα ισχύος 200 kW. Η μπαταρία που χρησιμοποιεί, είναι αποσπώμενη, βάρους 4.2 τόνων και η πλήρης φόρτιση μπορεί να επιτευχθεί σε περίπου 2 ώρες (Epiroc, 2023).

Η μεταφορά του υλικού από χώρους απόθεσης λουκιών σε σπαστήρες φρεάτων, μπορεί να γίνει με αυτοφορτωτές αλλά και με φορηγά υπογείων. Στην παρούσα εργασία, η μεταφορά του υλικού από τα λούκια στους σπαστήρες θα γίνει αποκλειστικά με φορηγά υπογείων. Το φορηγό MT42 της εταιρείας Epiroc είναι ένα ιδανικό μοντέλο που ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις αποκομιδής του μεταλλείου (Σχήμα 2.12). Έχει την δυνατότητα μεταφοράς 42 μετρικών τόνων υλικού. Έχει καθαρό βάρος 38 τόνων και φέρει 2 ηλεκτρικούς κινητήρες ισχύος 200 kW έκαστος. Οι διαστάσεις του φορηγού είναι 11 μέτρα μήκος, 3 μέτρα πλάτος και 2.6 μέτρα ύψος (5.5 μέτρα σε καθεστώς εκφόρτωσης) (Epiroc, 2023).



Σχήμα 2.12: Φορτηγό υπογείων MT42 Battery της εταιρείας Epiroc (SSAB, 2022)

Για την διάνοιξη των στοών προπαρασκευής χρησιμοποιούνται διατρητικά μετώπων (Jumbo). Η διάνοιξη των μετώπων γίνεται με κύκλους διάτρησης ανατίναξης καθιστώντας τα διατρητικά αναγκαίο εξοπλισμό. Υπάρχουν διάφορα διατρητικά που διαφοροποιούνται βάσει του αριθμού βραχιόνων (μπούμας) που φέρουν αλλά και για την επιφάνεια μετώπου που μπορούν να διατρήσουν. Στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθεί το διατρητικό Boomer S2 της εταιρείας Epiroc (Σχήμα 2.13).



Σχήμα 2.13: Διατρητικό (Jumbo) Boomer S2 της εταιρείας Epiroc (Epiroc, 2023).

Το συγκεκριμένο διατρητικό διαθέτει 2 μπούμες για ταυτόχρονη όρυξη έως και 2 διατρημάτων. Το μηχάνημα ζυγίζει 20 τόνους και διαθέτει κινητήρα υποδύναμης 120

HP. Οι διαστάσεις του είναι 12.2 m μήκος, 2 m πλάτος και 2.8 m ύψος με υπερυψωμένη την οροφή. Το διατρητικό μπορεί να διατρήσει σε μέγιστη επιφάνεια 56 m^2 (Epiroc, 2023).

2.2 Η μέθοδος Cut n' fill

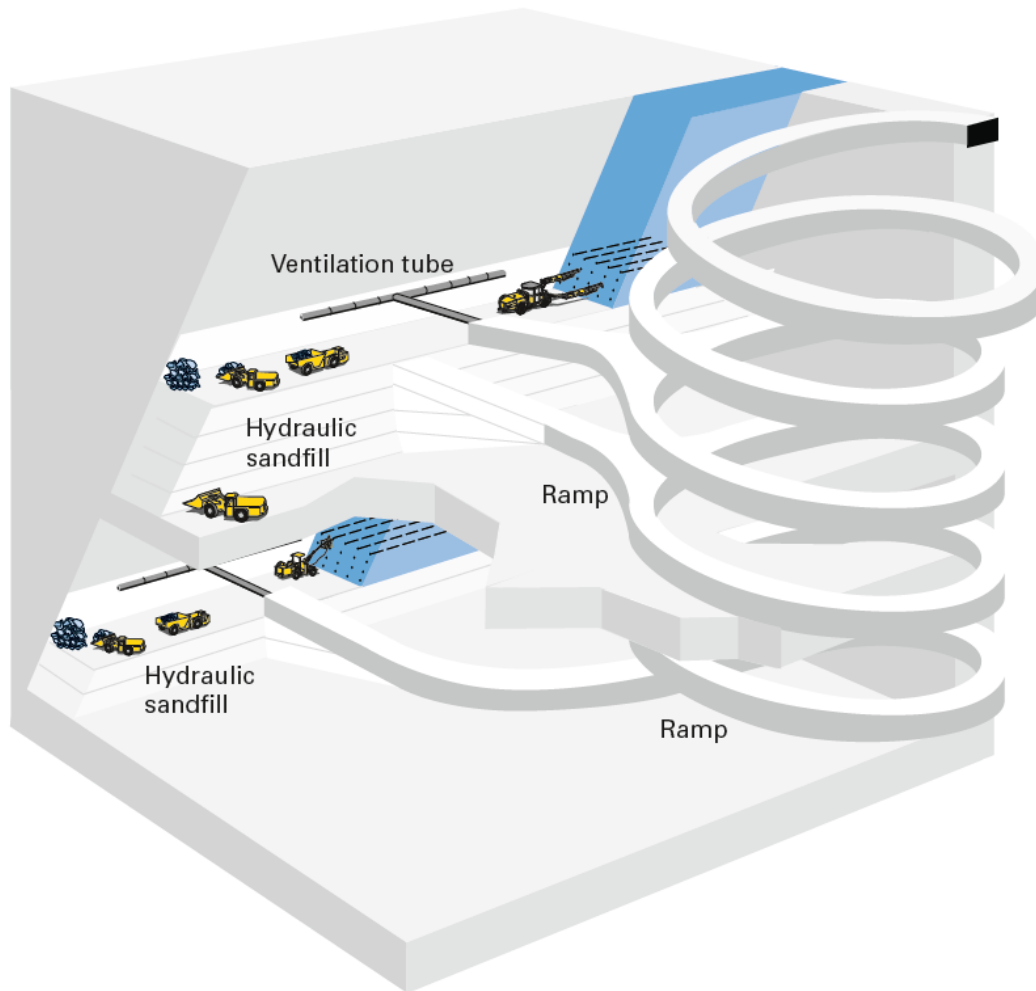
Η μέθοδος διαδοχικών κοπών και λιθογομώσεων (Cut n' fill) δεν αποτελεί αντικείμενο ανάλυσης αυτής της διπλωματικής εργασίας. Αναπόφευκτα λοιπόν, πρέπει να γίνει μια αναφορά σε αυτήν, καθώς στην συγκεκριμένη εργασία, αποτελεί βασική μέθοδο εκμετάλλευσης μετά το πέρας της οποίας θα εφαρμοστεί η μέθοδος VCR.

2.2.1 Αρχή λειτουργίας της μεθόδου

Η μέθοδος cut n' fill είναι από τις αρχαιότερες μεθόδους που εφαρμόστηκαν για την υπόγεια εκμετάλλευση ενός κοιτάσματος. Είναι μια ευέλικτη μέθοδος και προσαρμόζεται σχεδόν σε κάθε κοιτάσμα. Η χρήση της έγινε ιδιαίτερα διαδεδομένη σε μεγάλα βάθη όπου δεν είναι δυνατό να εκμεταλλευτεί ένα κοιτάσμα με μεθόδους κενών μετώπων. Η μέθοδος έχει την δυνατότητα επιλεκτικής εξόρυξης, εξαλείφοντας έτσι την αραίωση του μεταλλεύματος. Η εφαρμογή της μεθόδου περιλαμβάνει κύκλους διάτρησης - ανατίναξης και τοποθέτηση λιθογόμωσης μόλις εξοφληθεί μια «φέτα» κοιτάσματος πάχους 2 m έως 3 m (Gertch & Bullock, 1998).

Η εκμετάλλευση γίνεται από κάτω με κατεύθυνση προς τα πάνω. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται διάτρηση με σκοπό την γόμωση και ανατίναξη του μετώπου με καθορισμένο μήκος προχώρησης. Στη συνέχεια, μετά την αναμονή τουλάχιστον 30 λεπτών για την απομάκρυνση καυσαερίων της ανατίναξης, το θραυσμένο πέτρωμα απομακρύνεται με χρήση μηχανημάτων LHD και ένας ξεσκαρωτής αναλαμβάνει να απομακρύνει τυχόν επικρεμάμενους όγκους στην οροφή της στοάς που θα μπορούσαν να καταρρεύσουν. Η οροφή υποστηρίζεται πλήρως με αγκύρια και πλέγμα προστασίας και μπορεί να ξεκινήσει η νέα διάτρηση του μετώπου. Ένα τμήμα της εκμετάλλευσης μπορεί να έχει μήκος μερικές δεκάδες μέτρα και ύψος 4 m έως 7 m και η εκμετάλλευση γίνεται από κάτω προς τα πάνω. Μόλις εξορυχθεί πλήρως, εφαρμόζεται λιθογόμωση (μίγμα τσιμέντου και αδρανών) και μπορεί να εκμεταλλευτεί η ανώτερη φέτα μετά από ένα εύλογο διάστημα στερεοποίησης της λιθογόμωσης καθώς αυτή θα συνιστά το πάτωμα εργασίας για την επόμενη φέτα (Σχήμα 2.14).

Η πρόσβαση στα πατώματα γίνεται από κεκλιμένες ελικοειδής ράμπες και στοές προσβολής οι οποίες λιθογομώνονται όσο προχωράει προς τα ανώτερα πατώματα η εκμετάλλευση. Το εξορυγμένο υλικό μέσω λουκιών καταλήγει σε μια κύρια στοά μεταφοράς και από εκεί στην επιφάνεια.



Σχήμα 2.14: Άποψη της μεθόδου Cut n' fill (Hamrin, 2001).

Η μέθοδος Cut n' fill διαθέτει πολλές παραλλαγές. Η βασική εκδοχή της αφορά την εκμετάλλευση κοιτασμάτων με αρκετά μικρό πάχος, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε μεγαλύτερου πάχους κοιτάσματα. Η παραλλαγή της Cut n' Fill που θα εφαρμοστεί στα σχέδια της διπλωματικής εργασίας είναι η Drift n' fill. Η παραλλαγή αυτή, αφορά εκμετάλλευση κοιτασμάτων μεγάλου πάχους. Σε αυτή τη περίπτωση, η αντοχή του μεταλλεύματος δεν επιτρέπει την εξόρυξη του μεταλλεύματος με προσβολή ενός μόνο μετώπου ίσου πλάτους με αυτό του πάχους του κοιτάσματος. Η διαφορά λοιπόν με την βασική εκδοχή της μεθόδου, είναι ότι δημιουργούνται πολλές εγκάρσιες στοές με συγκεκριμένη αλληλουχία μέσα στο κοίτασμα. Η εκμετάλλευση δηλαδή διαιρείται σε

τμήματα και, σταδιακά εξορύσσεται όλο το μετάλλευμα σε κάθε κατεύθυνση αντικαθιστώντας το κενό με λιθογόμωση. Ουσιαστικά πρόκειται για την ίδια ακριβώς μέθοδο, πολλαπλώς εφαρμοζόμενη (εξόρυξη πολλών φετών) στο ίδιο επίπεδο (πάτωμα). Στο Κεφάλαιο 3: θα παρουσιαστεί αναλυτικότερα ο τρόπος που εφαρμόζεται η παραλλαγή αυτή.

2.2.2 Προϋποθέσεις μεθόδου Cut n' fill

Η μέθοδος Cut n' fill έχει συγκεκριμένες προϋποθέσεις για την ορθή εφαρμογή της, οι οποίες έχουν πολλά κοινά σημεία με αυτές της μεθόδου VCR. Κατά τον [Εξαδάκτυλο \(2005\)](#) οι προϋποθέσεις αυτές είναι οι εξής :

- Μεσαίες ως υψηλές μηχανικές αντοχές του μεταλλεύματος.
- Υψηλή εμπορική αξία μεταλλεύματος (ώστε να δικαιολογείται η υψηλού κόστους εφαρμογή της μεθόδου).
- Κανένας περιορισμός στις μηχανικές αντοχές του περιβάλλοντος πετρώματος.
- Ελάχιστο πάχος κοιτάσματος περίπου 1 m.
- Κλίση κοιτάσματος μεγαλύτερη από 45 μοίρες.
- Κανένας περιορισμός στην σύσταση του μεταλλεύματος (η διαλογή γίνεται επιτόπου και εύκολα)

Το βασικό πεδίο εφαρμογής της Cut n' fill είναι τα φλεβοειδή ή στρωματοειδή κοιτάσματα μεγάλης κλίσεως και υψηλής αντοχής μεταλλεύματος. Η γεωμετρία του κοιτάσματος δεν έχει τόση σημασία, είναι όμως θεμιτό να υπάρχει μεγάλη ανάπτυξη κατά την κάθετη διάσταση ([Gertch & Bullock, 1998](#)).

2.2.3 Λόγοι επιλογής της Drift n' fill με την VCR.

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι που θα μπορούσαν να εφαρμοστούν προτού εφαρμοστεί η μέθοδος VCR. Η Drift n' fill όμως επιλέχθηκε για δύο καθοριστικούς λόγους. Αρχικά, είναι προφανές ότι για να εφαρμοστούν δύο μέθοδοι υπόγειων εκμεταλλεύσεων ταυτόχρονα, πρέπει να έχουν σχεδόν τις ίδιες προϋποθέσεις εφαρμογής σε ένα κοίτασμα. Η μέθοδος Drift n' fill που επιλέχθηκε, εφαρμόζει καλύτερα από κάθε άλλη μέθοδο για τον σκοπό της διπλωματικής αυτής.

Ο πιο σημαντικός λόγος όμως, είναι η λιθογόμωση που χρησιμοποιείται για να υποστηρίξει τα μέτωπα της Drift n' fill μόλις εξορυχθούν. Η λιθογόμωση της πρώτης, αποτελεί και πλευρική υποστήριξη των στύλων προστασίας που θα εξορυχθούν με την

μέθοδο VCR. Η εφαρμογή λιθογόμωσης είναι απαραίτητη, αλλιώς θα ήταν αδύνατο να εφαρμοστεί η μέθοδος VCR.

Κεφάλαιο 3: Σχεδιασμός εκμεταλλεύσεων

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια εκτενής ανάλυση των σχεδίων που δημιουργήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής ενώ πρώτα θα παρουσιαστεί το κοίτασμα που έχει επιλεχθεί για τον σχεδιασμό των εκμεταλλεύσεων. Πιο συγκεκριμένα, θα παρουσιαστούν δυο τρόποι εκμετάλλευσης του δεδομένου κοιτάσματος: Α) η συνδυαστική εκμετάλλευση με δύο μεθόδους, την Drift n' fill που θα περιγραφεί πρώτη καθώς προηγείται χρονικά και την VCR και Β) η εκμετάλλευση με την χρήση της μεθόδου VCR ως αυτόνομη μέθοδος.

3.1 Επιλεχθέν κοίτασμα

3.1.1 Γενικές πληροφορίες κοιτάσματος

Η σχεδίαση των μεθόδων Drift n' fill και VCR έγινε με την επιλογή ενός πραγματικού κοιτάσματος ονόματι Kulthor στην περιφέρεια Queensland της Αυστραλίας. Πρόκειται για ένα κοίτασμα 2.3 χιλιόμετρα νοτιοδυτικά του επιφανειακού κοιτάσματος Osborne στην περιοχή Selwyn. Τα δύο όμορα κοιτάσματα ανήκουν στον γεωλογικό τομέα Kuridala-Selwyn και στο ευρύτερο σύμπλεγμα περιοχών με μεταλλευτικό ενδιαφέρον Mount Isa. Οι ακριβείς γεωγραφικές συντεταγμένες του κοιτάσματος είναι :

- Γεωγραφικό πλάτος $\varphi = 22^{\circ} 05' 34''$ B
- Γεωγραφικό μήκος $\lambda = 140^{\circ} 33' 02''$ A

Η ανακάλυψη της μεταλλοφορίας του οφείλεται σε ένα πρόγραμμα εξερεύνησης γεωτρήσεων το 1991. Η έρευνα συνεχίστηκε με περισσότερες γεωτρήσεις και την ανίχνευση βαρυτικής ανωμαλίας προερχόμενη από συγκεντρώσεις χαλκού 100 ppm σε μήκος 3 χιλιομέτρων. Το κοίτασμα Kulthor έχει υποστεί πλήρη εκμετάλλευση την περίοδο 2012 με 2015, εξολοκλήρου με υπόγειες μεθόδους (Valenta, 2018). Στο γειτονικό μεταλλείο Osborne, υπάρχει εγκατάσταση προπαρασκευής και εμπλουτισμού όπου γινόταν επεξεργασία του εξορυγμένου μεταλλεύματος και παραγωγή συμπυκνώματος χαλκού και χρυσού από το υπόγειο μεταλλείο Kulthor (Σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1: Δορυφορική εικόνα εγκαταστάσεων Osborne και Kulthor.

Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 3.1, το μεταλλείο διαθέτει χώρους εναπόθεσης υλικού, εργοστάσιο διαλογής και επεξεργασίας μεταλλεύματος, κτήρια διοίκησης και σε πολύ κοντινή απόσταση έναν αεροδιάδρομο. Είναι πιθανό να εφαρμόζεται η τακτική FI - FO (Fly in – Fly out), να πραγματοποιούνται δηλαδή τακτικά δρομολόγια αερομεταφορών των εργαζομένων από το μεταλλείο σε κάποια πόλη (πιθανώς την κοντινότερη Mount Isa city) και αντίστροφα. Η συγκεκριμένη τακτική αν και σχετικά υπολογίσιμου κόστους, εφαρμόζεται σε μεταλλεία που είναι αρκετά απομονωμένα, μακριά από κάθε ίχνος πολιτισμού και με ασύμφορη οδική μεταφορά. Ταυτόχρονα, νότια των εγκαταστάσεων σε απόσταση τριών χιλιομέτρων, εντοπίζεται ένα μικρό σύμπλεγμα οικιών για την περιστασιακή διαμονή των εργαζομένων κοντά στην περίμετρο του μεταλλείου (Σχήμα 3.2).



Σχήμα 3.2: Δορυφορική εικόνα συμπλέγματος οικιών Osborne.

Η μεταλλοφορία αποτελείται από χαλκό (Cu) και χρυσό (Au). Οι αρχικές έρευνες που διεξήχθησαν το 2012 πριν την εκμετάλλευση του κοιτάσματος Kulthor υποστήριξαν ότι υπήρχαν μετρημένα και ενδεικτικά αποθέματα 7.500.000 τόνων μεταλλεύματος περιεκτικότητας 1.6% χαλκού και 1.0 g/ton χρυσού. Επιπλέον, προστίθενται 5.400.000 τόνοι μεταλλεύματος περιεκτικότητας 1.3% χαλκού και 0.9 g/ton χρυσού από την κατηγορία των υποτιθέμενων αποθεμάτων. Η εκμετάλλευση διάρκειας 2 ετών το 2017 παρέδωσε νέα στοιχεία αποθεμάτων και συγκεκριμένα μετρημένα και ενδεικτικά αποθέματα 33,290,000 τόνων μεταλλεύματος περιεκτικότητας 0.86% χαλκού και 0.58 g/ton χρυσού. Ταυτόχρονα, στην κατηγορία των υποτιθέμενων αποθεμάτων υπάρχουν 7,900,000 τόνοι μεταλλεύματος περιεκτικότητας 0.79% χαλκού και 0.54 g/ton χρυσού, με βαθμό αποκοπής (cut-off grade) 0.75% (Valenta, 2018).

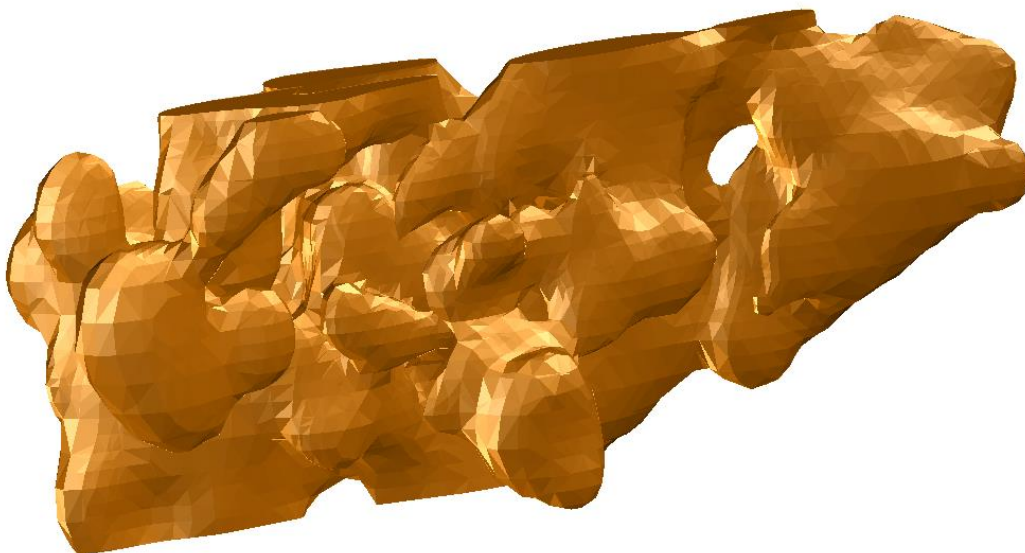
3.1.2 Χαρακτηριστικά μεταλλοφορίας.

Η ζώνη μεταλλοφορίας του Kulthor βρίσκεται στα όρια ενός ρήγματος αμφιβολίτη και εξαλλοιωμένου ψαμμίτη κατά τους Morrison & Orr (2002) με μήκος 4 χιλιόμετρα και πλάτος 400 μέτρα. Η ζώνη αυτή φιλοξενεί μεγάλου πάχους και απότομης κλίσης φλέβες αστρίων (χαλαζία – δολομίτη). Οι φλέβες αστρίων φιλοξενούν την υψηλότερη περιεκτικότητα σε μέταλλο σε ένα ψαθυρό σύστημα. Η μεταλλοφορία του κοιτάσματος Kulthor, είναι παρόμοια με αυτή του Osborne και πρόκειται για μια στενή ζώνη εξαλλοιωμένων και ανακρυσταλλωμένων πετρωμάτων που περικλείονται από πιο ισχυρά ανακρυσταλλωμένα και μερικώς τηγμένα πετρώματα (Morrison & Orr, 2002).

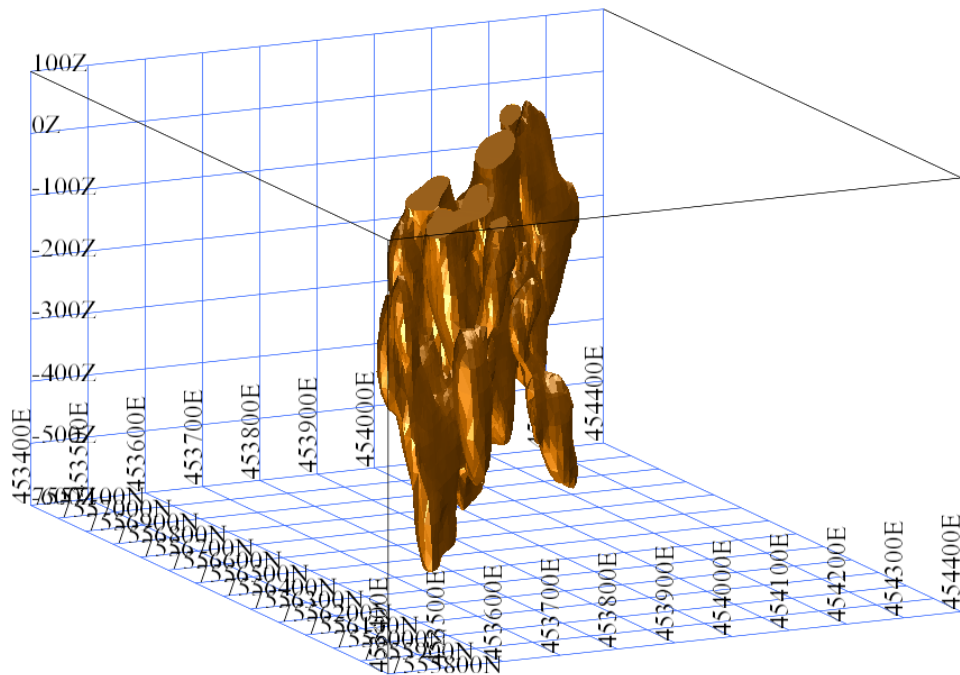
Πρόκειται για κατακόρυφες σειρές υψηλής συγκέντρωσης σουλφίδια φακοειδούς μορφής και φλέβες που εμπεριέχουν σουλφίδια και στυλόλιθους. Οι κατακόρυφες ζώνες σουλφιδίων εμπεριέχουν κυρίως χαλκοπυρίτη στα ανώτερα επίπεδα, σιδηροπυρίτη στα μεσαία και πυρροτίτη ως προς το βάθος. Η μεταλλοφορία που υπάρχει σε διασπορά εκτός της κύριας ζώνης μεταλλοφορίας αφορά σε κλίμακα εκατοστού, φλέβες δολομίτη που εμπεριέχουν χαλαζία, σιδηροπυρίτη, χαλκοπυρίτη, χλωρίτη και ασβεστίτη (Valenta, 2018). Η εν γένει περιγραφή της μεταλλοφορίας παραπέμπει σε χαρακτηριστικά ενός πορφυρυτικού κοιτάσματος.

3.1.3 Άποψη του κοιτάσματος

Το κοίτασμα που επιλέχθηκε, είναι πινακοειδούς μορφής με κλίση περίπου 90 μοιρών (σχεδόν κατακόρυφο). Το μοντέλο του κοιτάσματος όντας σχεδιασμένο σε πρόγραμμα της εταιρείας Autodesk, εισήχθη στο πρόγραμμα Surpac της εταιρείας Geovia από την βάση δεδομένων του Ινστιτούτου Βιώσιμων Ορυκτών (Sustainable Minerals Institute) του πανεπιστημίου Queensland της Αυστραλίας. Το μοντέλο τροποποιήθηκε κατάλληλα στο πρόγραμμα Surpac με την παραδοχή ότι θα υπάρχει μικρή συγκέντρωση και μεγάλη αραίωση για λόγους διευκόλυνσης του σχεδιασμού. Στο [Σχήμα 3.3](#) παρατίθεται μια άποψη σε τρισδιάστατη μορφή του κοιτάσματος και στο [Σχήμα 3.4](#) μια εικόνα κατά την κλίση του (GEOVIA, 2022).

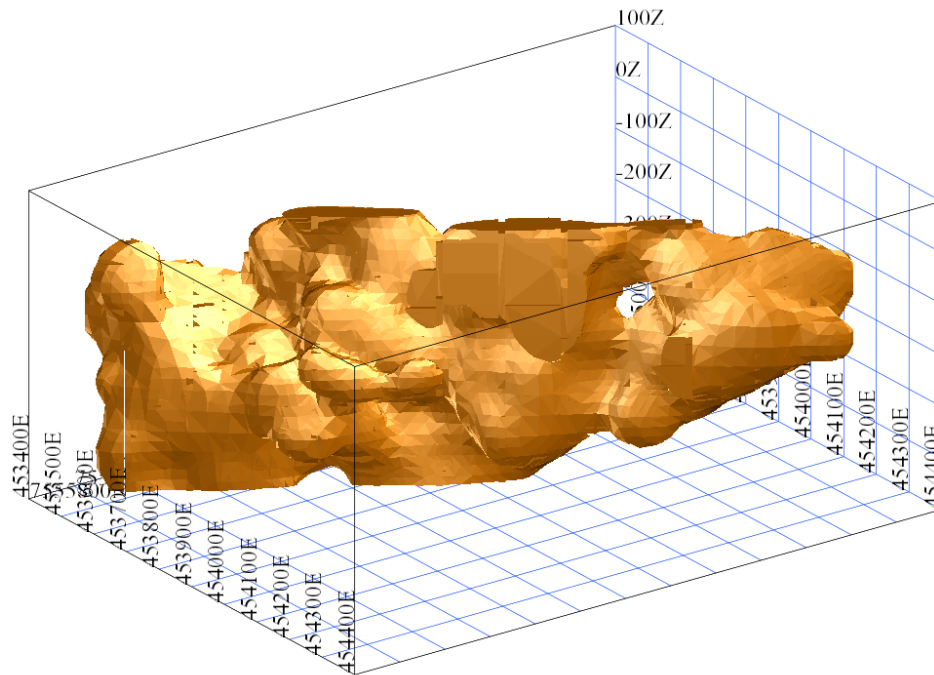


[Σχήμα 3.3:](#) Τρισδιάστατη απεικόνιση του κοιτάσματος (GEOVIA, 2022).

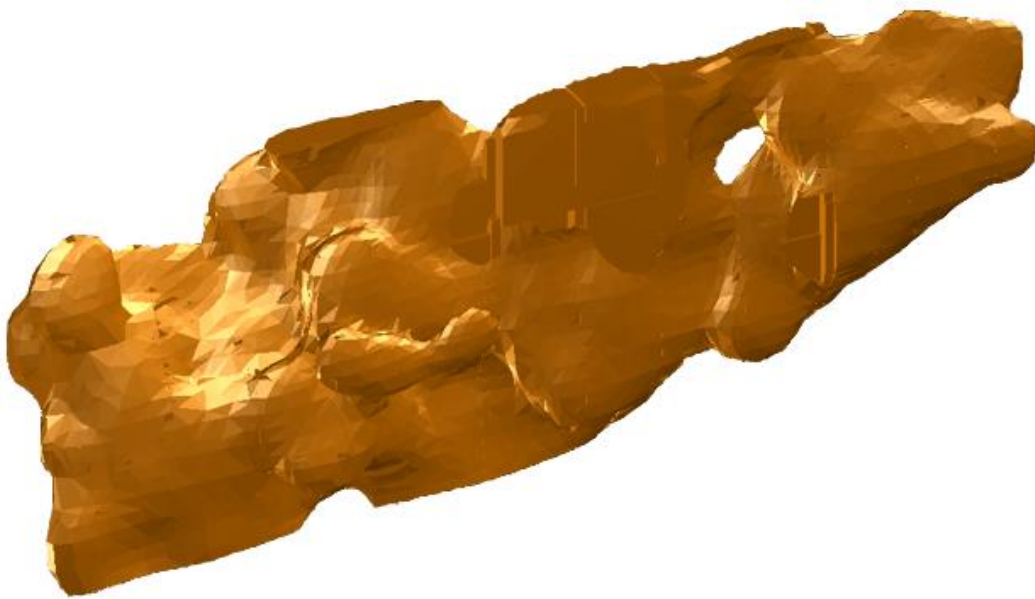


Σχήμα 3.4 Εικόνα του κοιτάσματος (GEOVIA, 2022).

Στο (Σχήμα 3.5) παρουσιάζεται το μέρος του κοιτάσματος που θα εκμεταλλευθεί σε τομή κατά την παράταξη ενώ, στο Σχήμα 3.6 παρουσιάζεται μια τρισδιάστατη απεικόνιση του. Το σύνολο των σχεδίων θα πραγματοποιηθεί στο λογισμικό Autodesk AutoCAD Civil 3D 2018 (Autodesk, 2018).



Σχήμα 3.5 Αποψη κοιτάσματος προς εκμετάλλευση κατά την παράταξη (GEOVIA, 2022)



Σχήμα 3.6: Άποψη του κοιτάσματος προς εκμετάλλευση σε τρισδιάστατη μορφή (GEOVIA, 2022).

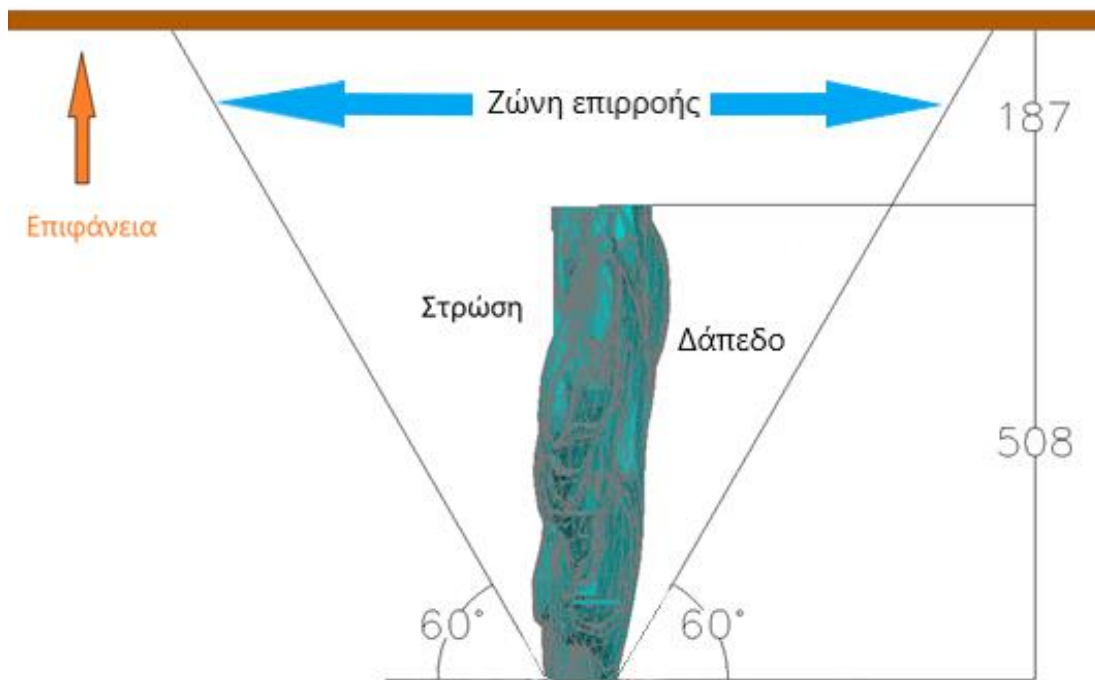
3.2 Σχεδιασμός μεθόδου Drift n' Fill

3.2.1 Έργα προσπέλασης Drift n' Fill

Το κοίτασμα βρίσκεται σε βάθος 200 m από την επιφάνεια και έχει έκταση σε βάθος 500 m. Δεδομένου αυτής της διάστασης βάθους, κρίνεται κατάλληλη η προσπέλαση με όρυξη φρεάτων. Ταυτόχρονα, πρέπει να ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι, οι μέθοδοι που θα εφαρμοστούν εμπεριέχουν την εφαρμογή πολλαπλών και ισχυρών ανατινάξεων, ικανών να επηρεάσουν σε υπολογίσιμο βαθμό τις μηχανικές αντοχές του περιβάλλοντος πετρώματος, ειδικά των υπερκειμένων στρωμάτων. Συνεπώς, τα βασικά (μόνιμα) έργα προσπέλασης θα προστατεύονται από τυχόν δονήσεις και καθιζήσεις του εδάφους ή υποχωρήσεις του περιβάλλοντος πετρώματος. Πιο συγκεκριμένα, λαμβάνοντας υπόψη την θεωρία Navier – Coulomb, θα δημιουργηθεί μια νοητή ζώνη επιρροής, εντός της οποίας τα έργα θα είναι επισφαλές να τοποθετηθούν, διατηρώντας έτσι μια ασφαλή απόσταση από τα έργα παραγωγής. Θεωρώντας ότι το υλικό έχει τιμή γωνίας τριβής ίση με $\varphi = 30^\circ$ θα υπολογιστεί η γωνία καθίζησης β με την [εξ. \(3.1\)](#).

$$\beta = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \quad (3.1)$$

Η ζώνη διαταραχής με τιμή καθίζησης $\beta = 60^\circ$ διαμορφώνεται από το χαμηλότερο σημείο του κοιτάσματος και εκτείνεται έως την επιφάνεια (αναπαρίσταται με πορτοκαλί χρώμα) όπως παρατηρείται στο [Σχήμα 3.7](#).



Σχήμα 3.7: Ζώνη επιρροής στο κοίτασμα (τομή κατά την κλίση).

Η κατασκευή των έργων προσπέλασης για λόγους ασφαλείας θα πραγματοποιηθεί από την μεριά του δαπέδου του κοιτάσματος και εκτός της ζώνης επιρροής. Ταυτόχρονα, θα εφαρμοστεί ισχυρή υποστήριξη στα τοιχώματα των έργων που θα περιλαμβάνει αγκύρια, πλέγματα και σκυρόδεμα. Ο σχεδιασμός προβλέπει την όρυξη τριών φρεάτων κυκλικής διατομής (με μωβ χρώμα στο παρακάτω σχήμα) για την εκμετάλλευση σε πρώτο στάδιο, ένα στο μέσον του κοιτάσματος και δύο στις άκρες του με εμβαδόν διατομής 50 m^2 (αρχική διάμετρο 8 m). Η κυκλική διατομή προσφέρει αυξημένη αντοχή και στεγανότητα, ενώ επιτρέπει την ροή του αέρα με την λιγότερη δυνατή αντίσταση (Οικονομόπουλος, 1989). Η διάμετρος των φρεάτων προκύπτει από έρευνα βιβλιογραφική και τεχνικούς περιορισμούς όπως το ελάχιστο μέγεθος των μηχανημάτων που θα χρησιμοποιηθούν, την απαιτούμενη παραγωγή (η οποία απαιτεί ανάλογο εξοπλισμό) και τις ανάγκες αερισμού. Πιο συγκεκριμένα, θεωρείται ότι η παραγωγή προσεγγίζει τους 3000 τόνους ανά ημέρα. Στον Πίνακα 3.1 παρατίθενται διατομές φρεάτων μεταλλικών μεταλλείων συναρτήσει της ετήσιας παραγωγής και του τρόπου ανέλκυσης.

Πίνακας 3.1: Διατομές φρεάτων βάσει ετήσιας παραγωγής και τρόπου ανέλκυσης (Οικονομόπουλος, 1989).

| Ετήσια παραγωγή (χιλιάδες τόνους) | Τρόπος ανέλκυσης | Αρχική διατομή (m^2) | Ωφέλιμη διατομή (m^2) |
|--------------------------------------|------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| 30-70 | Κλωβός | 11.2 | 7.74 |

| | | | |
|----------|-----------------|-------|-------|
| | | 16.8 | 12.25 |
| | | 18.5 | |
| 100-300 | | 17.4 | 12.60 |
| | | 24.2 | 18.60 |
| | | 27.28 | 18.60 |
| | | 30.20 | 23.70 |
| | | 25.50 | 19.60 |
| 300-600 | Κλωβός και skip | 33.00 | 23.10 |
| | | 36.30 | 28.26 |
| 600-1500 | | 41.82 | 33.16 |
| | | 55.39 | 44.15 |

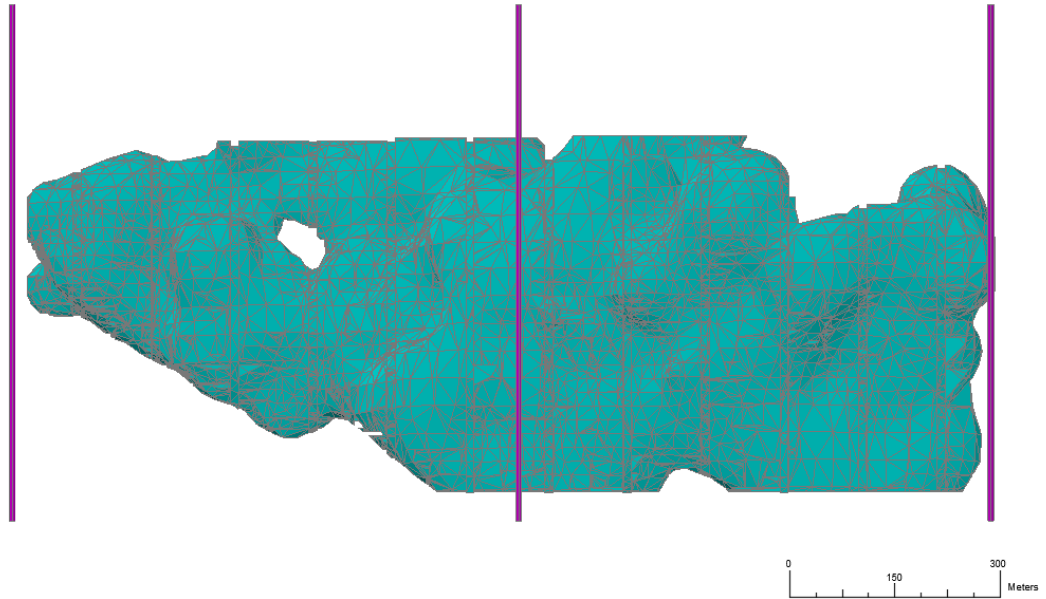
Επιπλέον, το μεταλλείο εκτείνεται σε μεγάλο βάθος με αποτέλεσμα την αυξημένη ανάγκη παροχής αέρα, το οποίο συνεπάγεται μεγάλη ταχύτητα. Τα μηχανήματα που θα χρησιμοποιηθούν έχουν μέγιστο ύψος 3 μέτρα, μέγιστο πλάτος 3 μέτρα και μέγιστο μήκος 11 μέτρα και προκειμένου να μεταφερθούν μέσω κλωβού σε ένα φρέαρ διασπώνται σε μικρότερα μέρη. Συνεπώς, βάσει των παραπάνω συνθηκών, κρίνεται ότι η διάμετρος 8 μέτρων ενός φρέατος εξυπηρετεί πάσης φύσεως ανάγκη. Το φρέαρ στο μέσον του κοιτάσματος θα εξυπηρετεί κυρίως τις ανάγκες προσπέλασης στο κοίτασμα και θα διαθέτει κατάλληλο ανελκυστήρα - κλωβό για την ανέλκυση οχημάτων και ανθρωπίνου δυναμικού ενώ δύναται να χρησιμοποιηθεί και ως φρέαρ παραγωγής μειωμένης όμως δυναμικότητας. Τα φρέατα στις άκρες του κοιτάσματος (με μωβ χρώμα στο [Σχήμα 3.8](#)) θα εξυπηρετούν την ανέλκυση του εξορυγμένου μεταλλεύματος με χρήση κάδων ανέλκυσης (Skip) και θα λειτουργούν ως δεύτερη έξοδος διαφυγής σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης.

Η επιλογή των κάδων ανέλκυσης έναντι των ανελκυστήρων οχημάτων για την μεταφορά του μεταλλεύματος στην επιφάνεια έγινε λαμβάνοντας υπόψη τα εξής πλεονεκτήματα ([Ramlu, 1996](#)):

- Αυξημένη παραγωγικότητα.

- Οι διαστάσεις των φορτηγών οχημάτων δεν εξαρτώνται από τις διαστάσεις του φρέατος παραγωγής επιτρέποντας την καλύτερη επιλογή οχημάτων που θα λειτουργούν στο μεταλλείο.
- Είναι πιο ομαλή η ανέλκυση του μεταλλεύματος σε σχέση με ενός πολλού επιπέδου ανελκυστήρα οχημάτων ο οποίος υποβάλλει τα καλώδια ανέλκυσης σε μεγαλύτερες τάσεις.
- Απαιτείται λιγότερο προσωπικό για την λειτουργία ενός Skip.
- Απαιτούνται λιγότερα φορτηγά για την ομαλή λειτουργία του μεταλλείου αφού δεν δεσμεύονται οχήματα για την μεταφορά του μεταλλεύματος στην επιφάνεια.
- Μεταφέρεται μόνο το μέταλλευμα και όχι και το φορτηγό επιτρέποντας την επιλογή καλωδίων ανέλκυσης μικρότερης διαμέτρου και μικρότερης δυναμικότητας μηχανισμού ανέλκυσης.
- Λιγότερα κόστη συντήρησης και επισκευής.

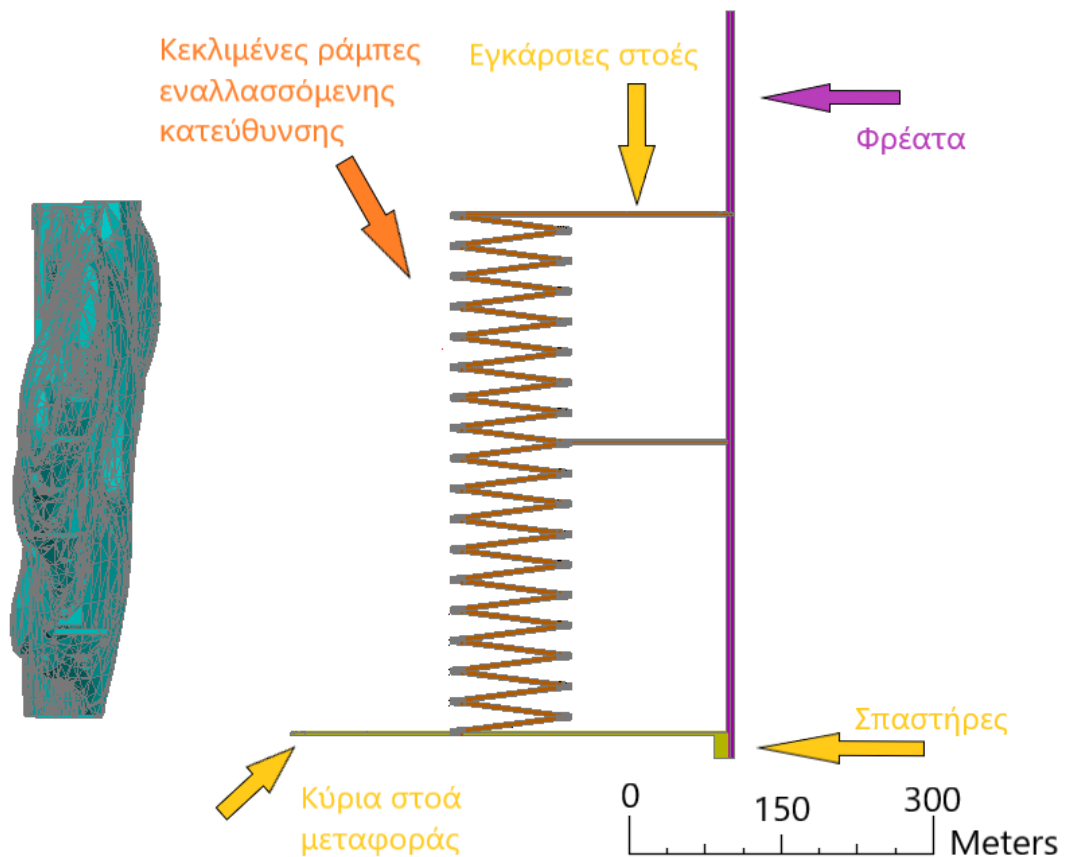
Η απόσταση που διανύει από τον πυθμένα του φρέατος μέχρι την επιφάνεια είναι περίπου 750 m. Θεωρώντας ότι το skip έχει μέγιστη ταχύτητα 15 m/sec μια διαδρομή από και προς τον πυθμένα θα πραγματοποιείται σε περίπου 2 λεπτά προσαυξημένα κατά 3 για τυχόν καθυστερήσεις. Η ωριαία παραγωγή, αν θεωρηθεί ότι το μεταλλείο λειτουργεί 12 ώρες την μέρα και για ιδανικές συνθήκες λειτουργίας του μεταλλείου, ανέρχεται σε 250 τόνους, με ειδικό βάρος μητρικού πετρώματος ίσο με $2.5 \left(\frac{tn}{m^3}\right)$. Συνεπώς αν σε μια ώρα γίνονται περίπου 10 παραδόσεις μεταλλεύματος στην επιφάνεια τότε απαιτείται ένα Skip δυναμικότητας 25 τόνων.



Σχήμα 3.8: Θέση των φρεάτων για την ανάπτυξη των έργων προσπέλασης και παραγωγής (τομή κατά την παράταξη).

Η ανάπτυξη των έργων έχει συγκεκριμένη αλληλουχία (δεν γίνονται όλα ταυτόχρονα) η οποία εξαρτάται από τον τρόπο και την κατεύθυνση της εξόρυξης σε μια μέθοδο. Στην υποενότητα 3.2.3 θα γίνει διεξοδική ανάλυση του τρόπου ανάπτυξης των έργων μαζί με τον τρόπο εξέλιξης των μεθόδων εκμετάλλευσης.

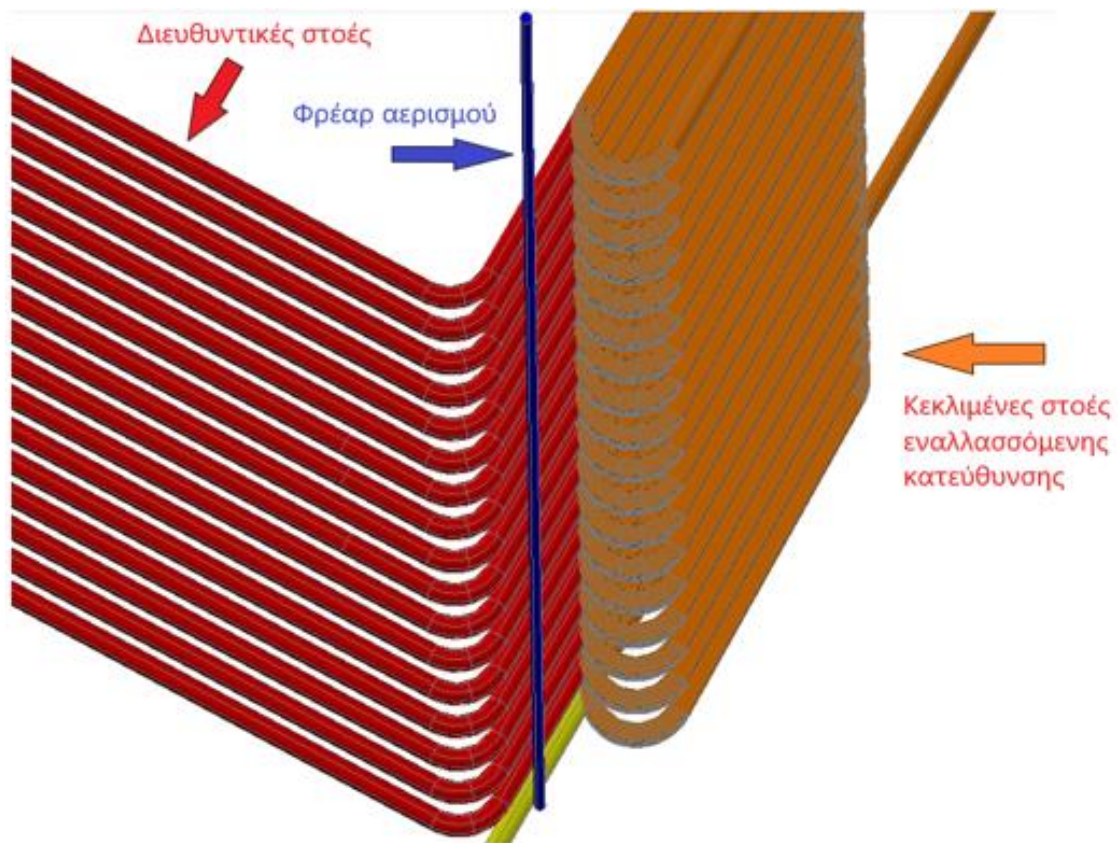
Το κοίτασμα έχει μεγάλες διαστάσεις και θα απαιτηθούν πολλές εγκάρσιες στοές προσβολής και διευθυντικές στοές. Τα έργα προσπέλασης θα είναι ακριβώς τα ίδια και για τις δύο μεθόδους που θα εφαρμοστούν. Η μέθοδος Drift n' fill θα εφαρμοστεί πρώτη, συνεπώς έγινε μια προσαρμογή των έργων προσπέλασης στον σχεδιασμό των έργων της μεθόδου ώστε να είναι όσο το δυνατό πιο οικονομική και αποτελεσματική η εκμετάλλευση του κοιτάσματος. Κάθε διευθυντική στοά θα απευθύνεται σε μια (οριζόντια) σειρά ορόφων σε συγκεκριμένο ύψος όπου εξυπηρετεί καλύτερα την όρυξη των στοών προσβολής. Συνεπώς, βάσει του σχεδιασμού θα υπάρχει μια διευθυντική στοά ανά 30 μέτρα η οποία θα πρέπει να συνδέεται με τα φρέατα. Το πρόβλημα που προκύπτει είναι πως δεν είναι δυνατό η σύνδεση αυτή να γίνεται απευθείας. Είναι επισφαλές τα φρέατα να προσβάλλονται από μια πυκνή κατασκευή διευθυντικών στοών. Ο σχεδιασμός προβλέπει την όρυξη εγκάρσιων στοών από κάθε φρέαρ, οι οποίες θα καταλήγουν σε μια κεκλιμένη ράμπα εναλλασσόμενων κατευθύνσεων (Σχήμα 3.9).



Σχήμα 3.9: Κεκλιμένες ράμπες εναλλασσόμενης κατεύθυνσης (τομή κατά την κλίση).

Η ράμπα αυτή έχει τετραγωνική διατομή 5 m x 5 m, συνολικό μήκος 3286 m, κλίση 12 μοιρών και ακτίνα καμπυλότητας 12 m και σκοπός της είναι να συνδέσει έμμεσα τις διεθυντικές στοές μεταξύ τους και με τα φρέατα εξαλείφοντας τα όποια ενδεχόμενα προβλήματα στατικότητας. Η μετακίνηση του εξοπλισμού και του προσωπικού μεταξύ ορόφων θα γίνεται ουσιαστικά μέσω της ράμπας αυτής.

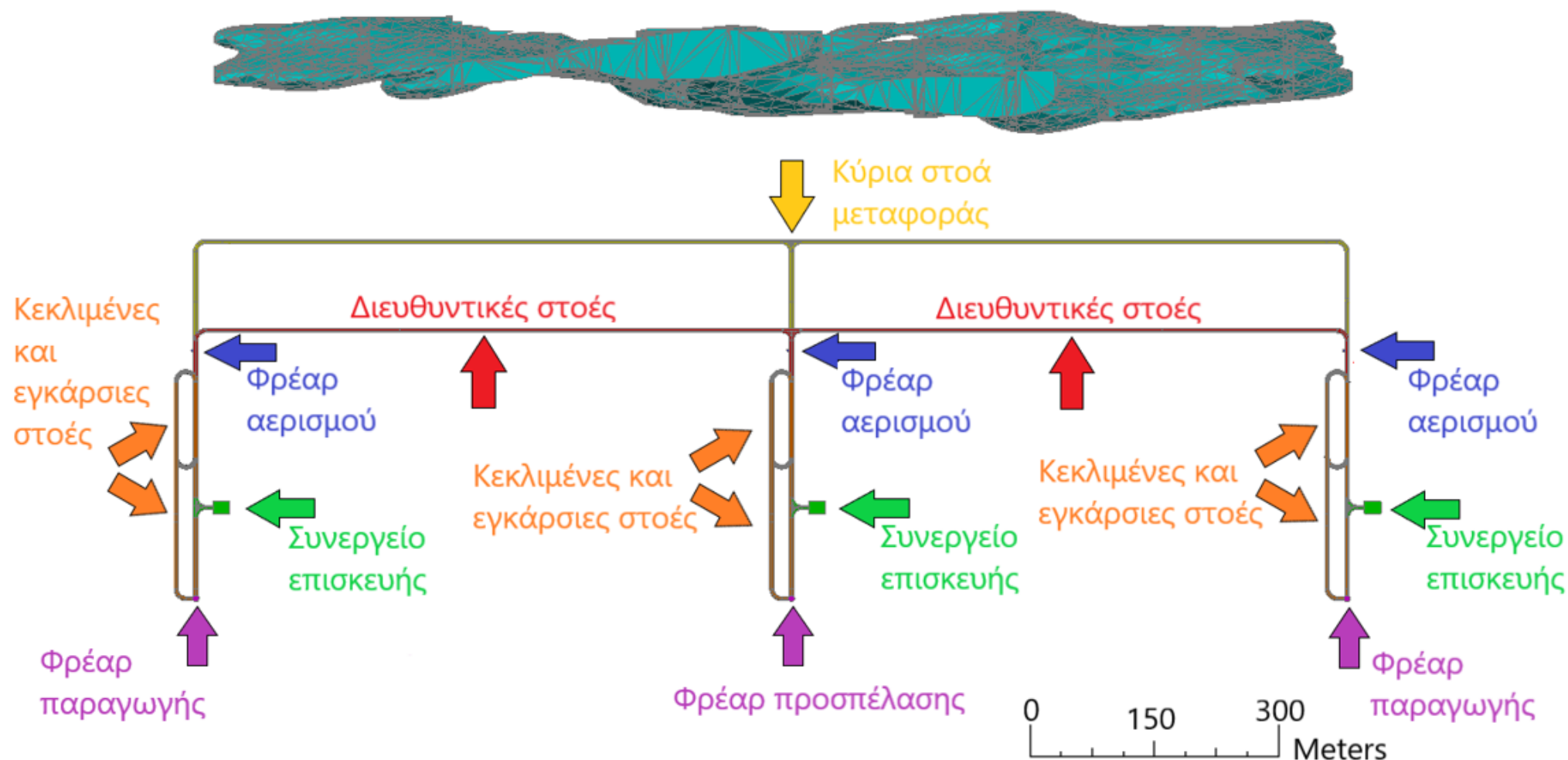
Ταυτόχρονα, ο φυσικός αερισμός σε ένα μεταλλείο με βάθος όσο το παρόν που σχεδιάζεται δεν ικανοποιεί τις ανάγκες αερισμού των μετώπων εργασίας. Συνεπώς, στις στοές διασύνδεσης των διεθυντικών στοών με τις κεκλιμένες ράμπες έχει προβλεφθεί η ύπαρξη ενός βοηθητικού φρέατος αερισμού διαμέτρου 3 μέτρων (Σχήμα 3.10).



Σχήμα 3.10: Τρισδιάστατη απεικόνιση του φρέατος αερισμού και των κεκλιμένων ραμπών.

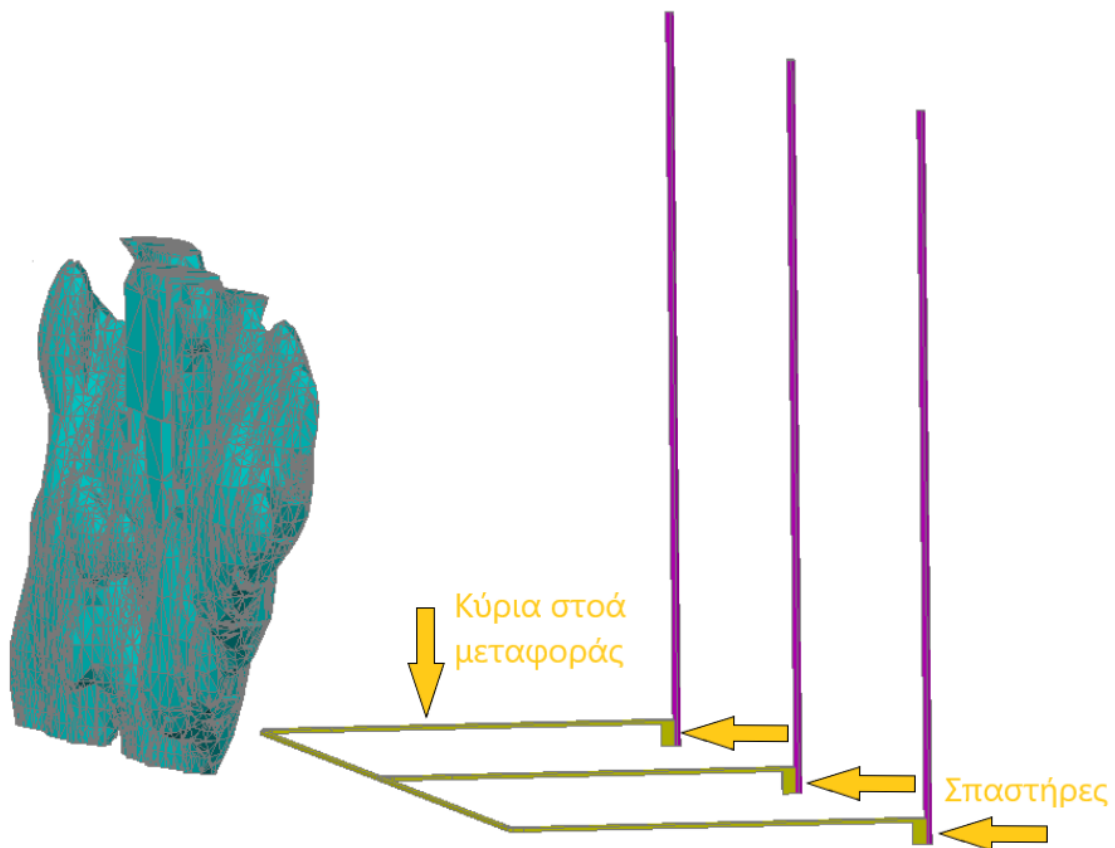
Το φρέαρ αυτό θα ενισχύει την παροχή αέρα μέσω φυσητικών ανεμιστήρων που θα βρίσκονται στην επιφάνεια. Ταυτόχρονα, για τον έλεγχο της κατεύθυνσης του παρεχόμενου ρεύματος αέρα θα χρησιμοποιηθούν ειδικές κουρτίνες που θα το ανακατευθύνουν στις στοές που απαιτείται, σφραγίζοντας άλλες όπου δεν υπάρχει δραστηριότητα. Ο αερισμός των μετώπων, ειδικά στην μέθοδο VCR είναι ένα πολύπλοκο πρόβλημα το οποίο δεν θα μελετηθεί εκτενέστερα στην παρούσα εργασία αφού ξεφεύγει από το αντικείμενο της.

Στο ήμισυ του βάθους εκμετάλλευσης του κοιτάσματος, σε κάθε διασύνδεση φρέατος και κεκλιμένης ράμπας προβλέπεται επίσης η κατασκευή ενός χώρου με διαστάσεις 20 m μήκος, 15 m πλάτος και 8 m ύψος που θα λειτουργεί ως συνεργείο επισκευής των μηχανημάτων και ως σημείο ανεφοδιασμού σε νερό και καύσιμα (Σχήμα 3.11). Στο Σχήμα 3.11 παρατηρούνται με μωβ χρώμα τα φρέατα προσπέλασης/παραγωγής, με πορτοκαλί οι κεκλιμένες και εγκάρσιες στοές, με πράσινο τα συνεργεία, με μπλε τα φρέατα αερισμού, με κόκκινο οι διευθυντικές στοές και με κίτρινο η κύρια στοά μεταφοράς.



Σχήμα 3.11: Κάτοψη έργων προσπέλασης (μαζί με τις διευθυντικές και την κύρια στοά μεταφοράς).

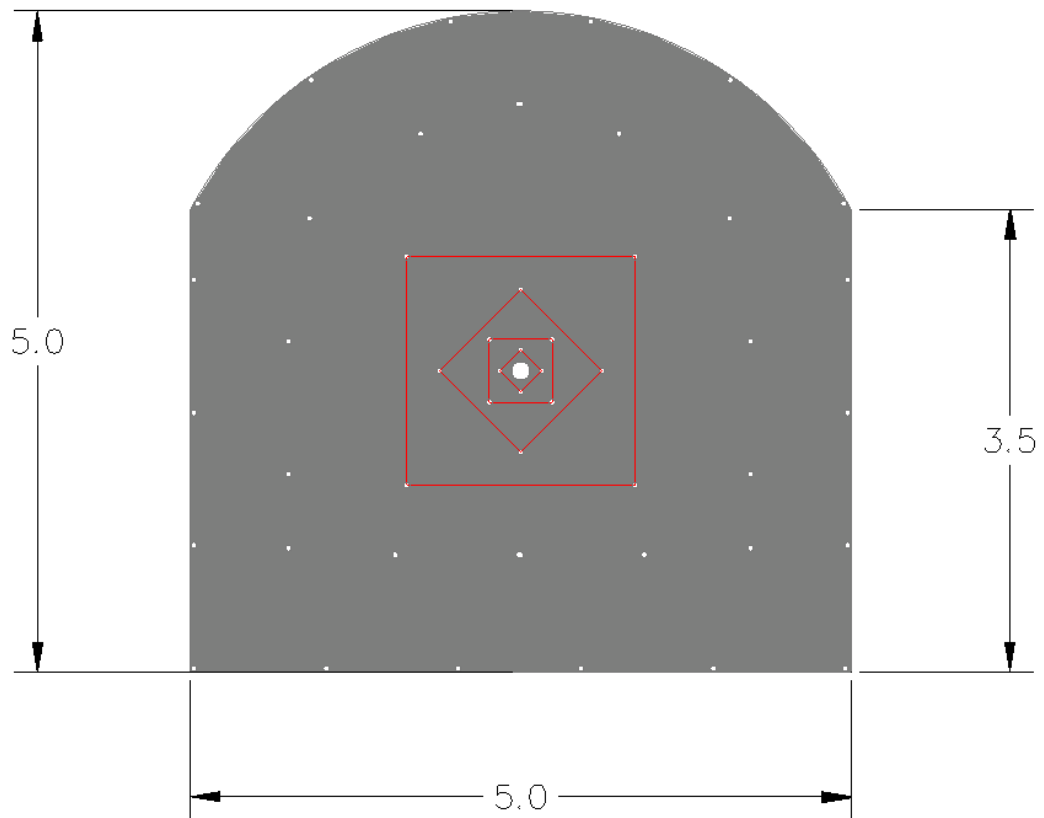
Εν τέλει, η κατώτερη στοά που θα κατασκευαστεί και ανήκει στα έργα προπαρασκευής, θα είναι η κύρια στοά μεταφοράς υλικού. Σε αυτή την στοά θα λειτουργούν διαρκώς φορτηγά και φορτωτές οι οποίοι θα μεταφέρουν το μέταλλευμα από τις απολήξεις των λουκιών στους σπαστήρες των φρεάτων. Η στοά έχει μια προέκταση και δεν βρίσκεται ακριβώς κάτω από τις υπόλοιπες διευθυντικές στοές. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της θέσης των λουκιών τα οποία έχουν τοποθετηθεί όσο πιο κοντά γίνεται στα μέτωπα ώστε να μειώνονται οι αποστάσεις που πρέπει να διανύσουν τα LHD. Η στοά μεταφοράς οδηγεί στους σπαστήρες, οι οποίοι τοποθετούνται σε κατάλληλο χώρο διαστάσεων 12 m μήκος, 5 m πλάτος και 20 m ύψος. Η θέση των σπαστήρων βρίσκεται ακριβώς δίπλα από τον πυθμένα των φρεάτων ώστε να τροφοδοτούν απευθείας τους κάδους ανέλκυσης των δεύτερων (Σχήμα 3.12).



Σχήμα 3.12 Τρισδιάστατη απεικόνιση της κύριας στοάς μεταφοράς, ελλείπει υπόλοιπων έργων

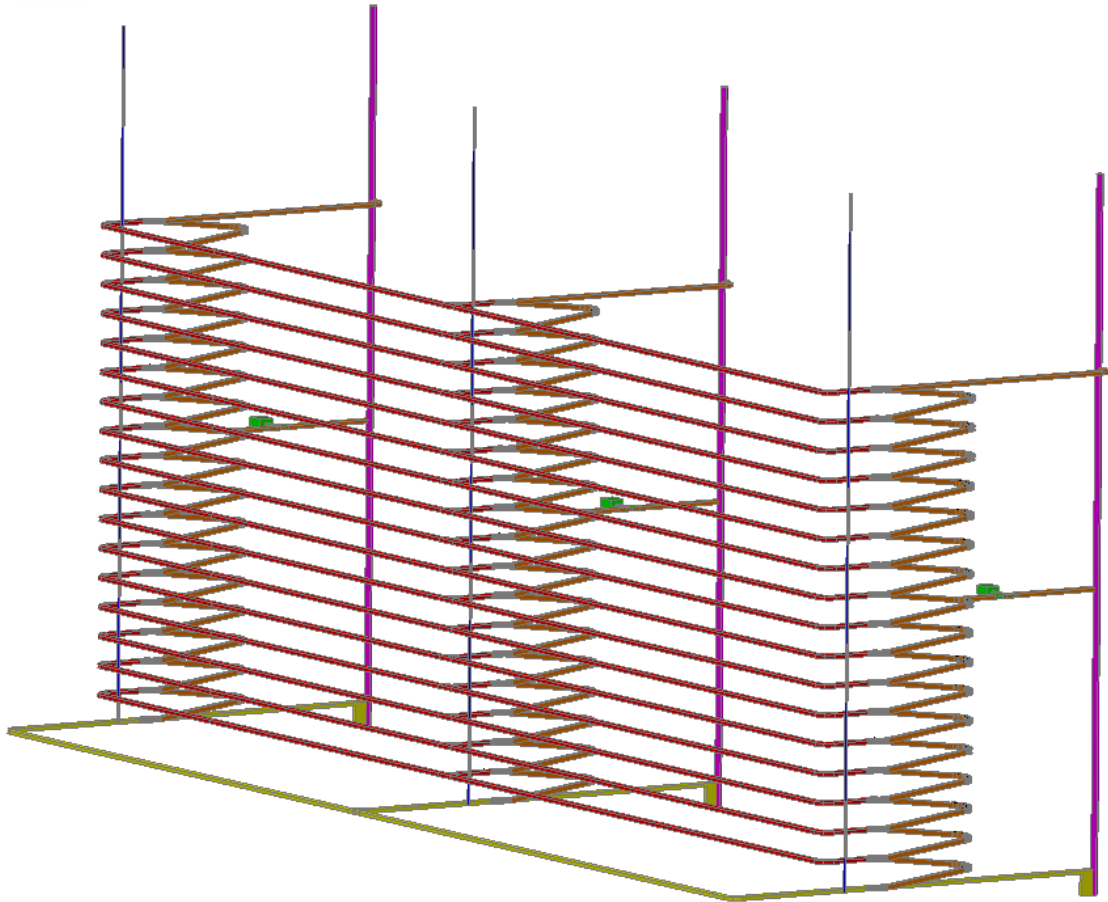
Οι εγκάρσιες στοές, οι διευθυντικές και η στοά μεταφοράς, έχουν ύψος και πλάτος ίσο με πέντε μέτρα και είναι πεταλοειδούς μορφής. Η διάνοιξη των στοών προσπέλασης γίνεται με συμβατικό κύκλο διάτρησης – ανατίναξης και με συγκεκριμένο κάν-

ναβο ανατινάξεων (Σχήμα 3.13). Ο λόγος που υιοθετήθηκε η συγκεκριμένη μορφή διατομής είναι για την ομαλότερη κατανομή των τάσεων στην οροφή που προέρχονται κυρίως από το βάρος των υπερκείμενων πετρωμάτων.



Σχήμα 3.13 Διαστάσεις και κάναβος διάτρησης μιας στοάς προσπέλασης

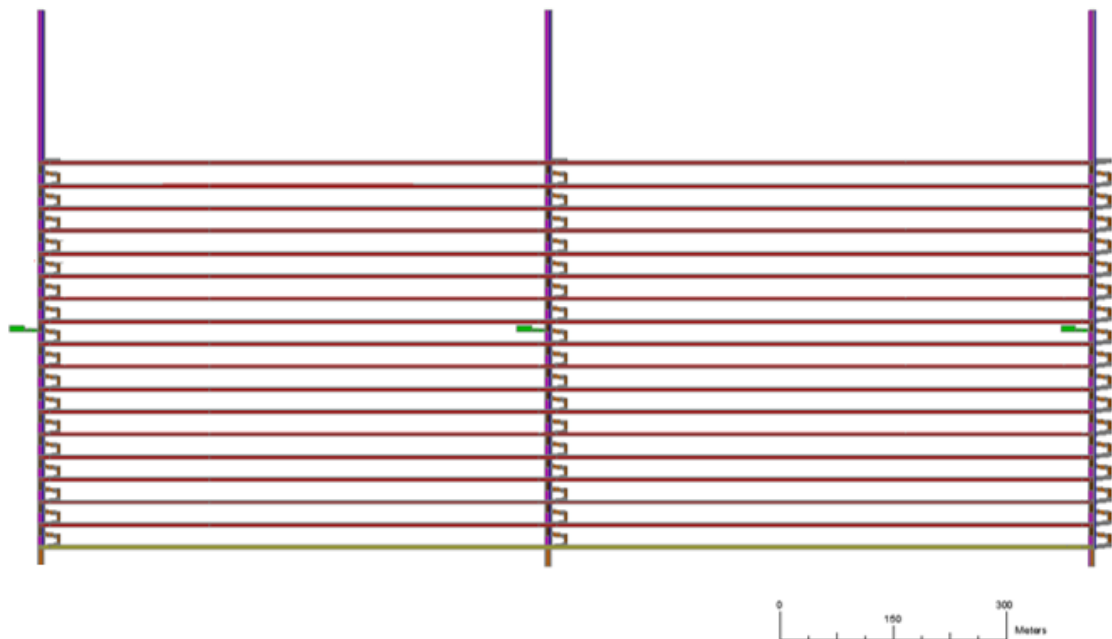
Εν τέλει στο Σχήμα 3.14 παρουσιάζεται το σύνολο των έργων προσπέλασης μαζί με την κύρια στοά μεταφοράς σε τρισδιάστατη απεικόνιση.



Σχήμα 3.14: Τρισδιάστατη απεικόνιση του συνόλου των έργων προσπέλασης, των διεθυντικών στοών και της κύριας στοάς μεταφοράς.

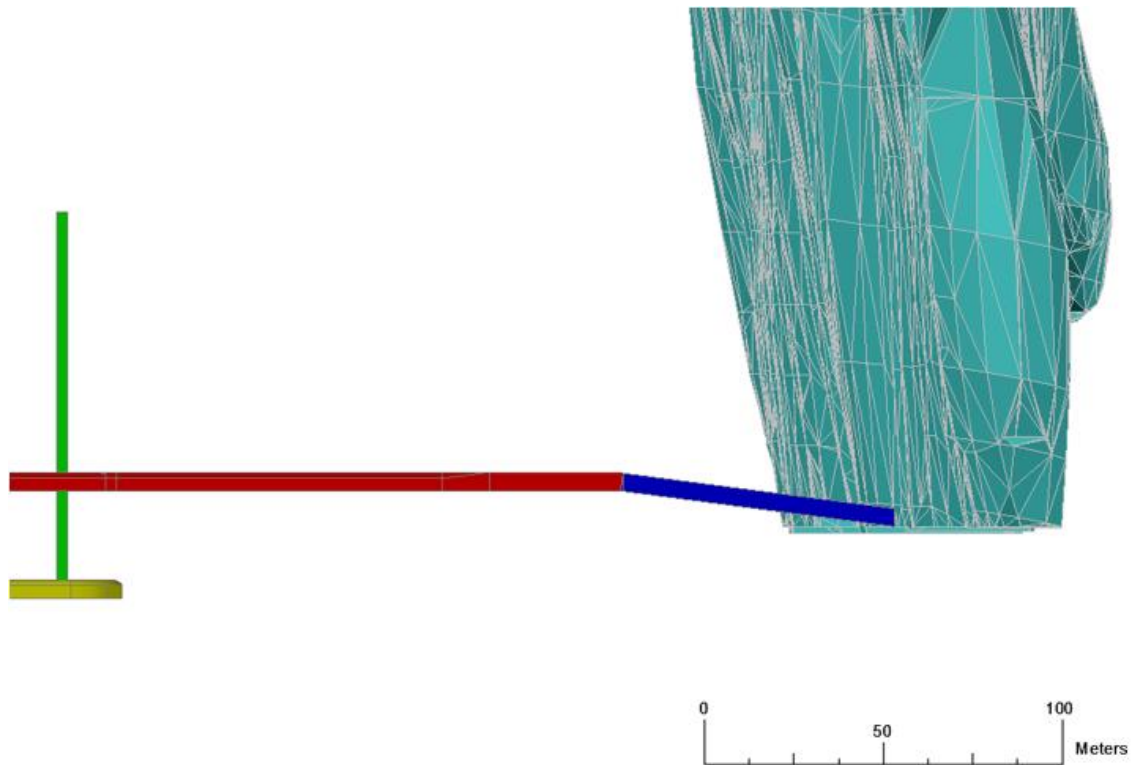
3.2.2 Έργα προπαρασκευής Drift n' Fill

Στα έργα προπαρασκευής λογίζονται αρχικά οι διεθυντικές στοές που περιχάρσσουν το κοίτασμα οριζοντίως. Οι στοές αυτές έχουν διαφορά ύψους μεταξύ τους 30 μέτρα και είναι παράλληλες με την παράταξη του κοιτάσματος (Σχήμα 3.15).



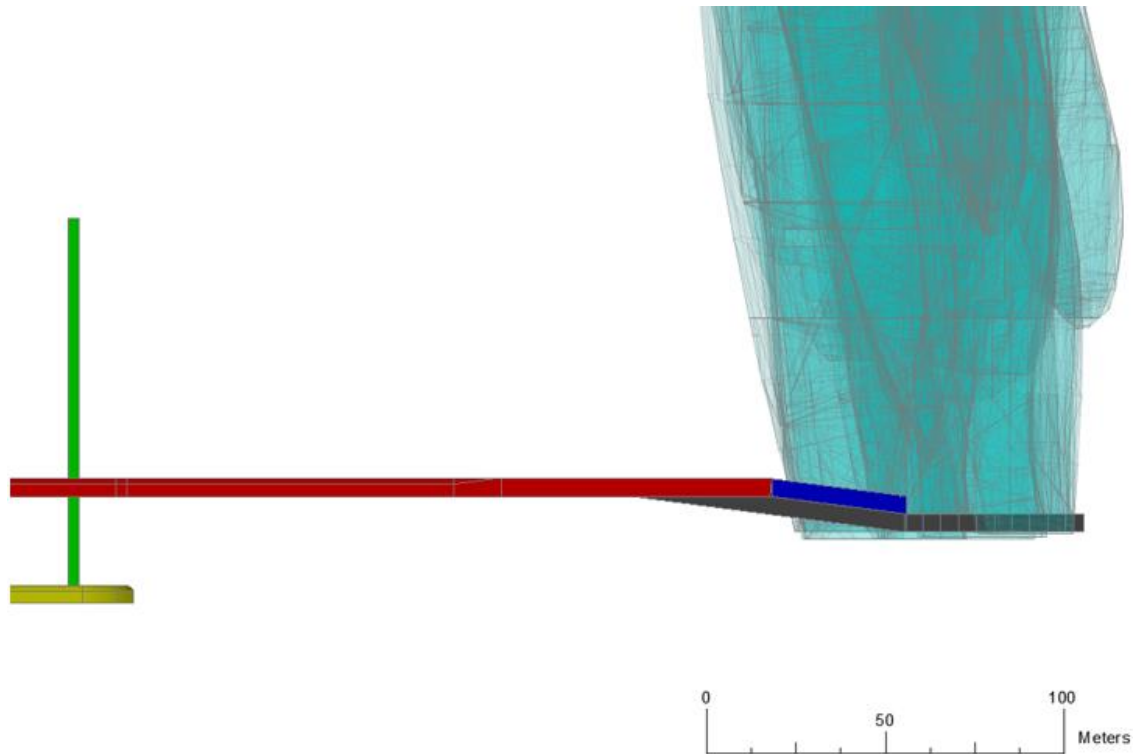
Σχήμα 3.15 : Διάταξη διευθυντικών στοών

Στη παρούσα περίπτωση, βρίσκονται εκτός του κοιτάσματος και εκτείνονται σε όλο το μήκος του, συνδέοντας τα φρέατα με τα έργα εντός του κοιτάσματος. Ένας όροφος αποτελείται από 6 πατώματα ύψους 5 μέτρων έκαστο και η προσβολή του κάθε πατώματος του κοιτάσματος γίνεται κατά κανόνα κεντροβαρικά. Συνεπώς, κάθε διευθυντική στοά είναι τοποθετημένη στο ύψος του τρίτου πατώματος κάθε ορόφου. Αυτό συμβαίνει ώστε να δημιουργηθούν 2 κεκλιμένες στοές προσβολής (ράμπες) με αρνητική κλίση και τρεις με θετική. Πιο συγκεκριμένα, από την διευθυντική στοά ορύσσεται μια μηδενικής κλίσης εγκάρσια στοά προσβολής και σε κατάλληλη απόσταση από το κοίτασμα η όρυξη συνεχίζεται καθοδικά με αρνητική κλίση 13% δημιουργώντας την είσοδο στο κατώτερο πάτωμα του ορόφου (Σχήμα 3.16).



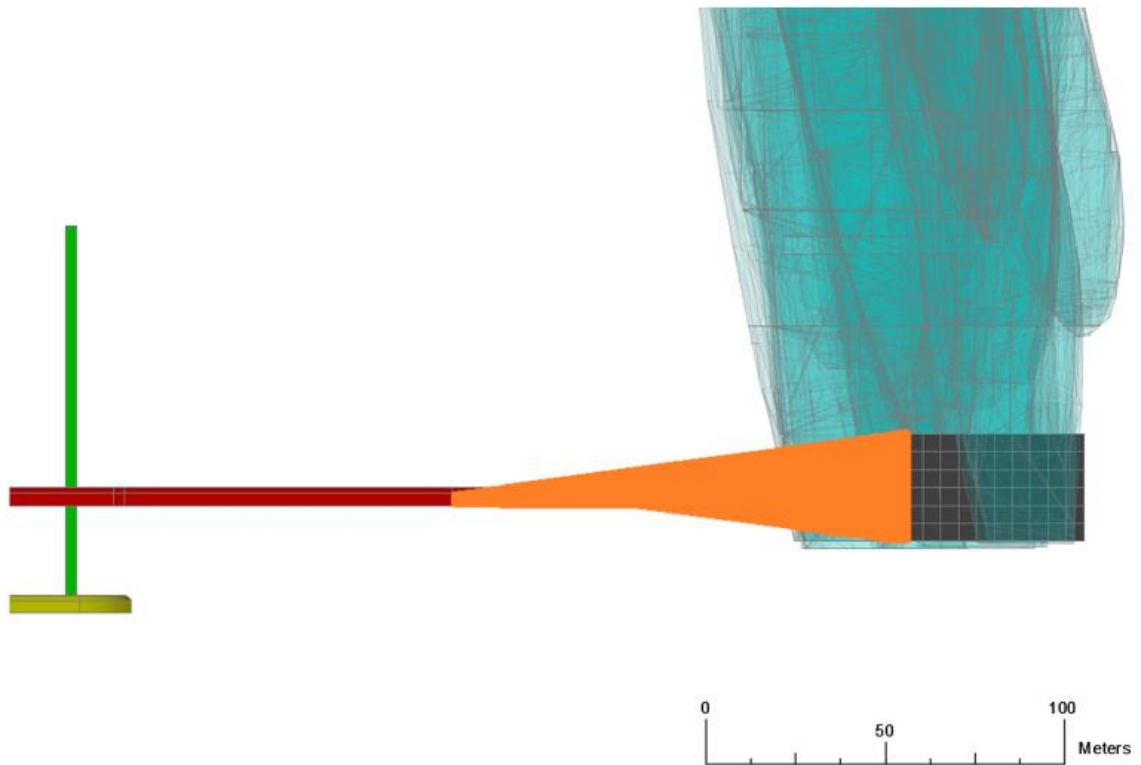
Σχήμα 3.16: Όρυξη εγκάρσιας στοάς προσβολής πρώτου πατώματος (τομή κατά την κλίση του κοιτάσματος).

Το πάτωμα αυτό μόλις εξοφληθεί με συγκεκριμένη αλληλουχία εξόρυξης, θα λιθογομωθεί μαζί με αυτό και το κεκλιμένο τμήμα της στοάς που παρείχε πρόσβαση στο πάτωμα. Εν συνεχεία, η λιθογόμωση του πατώματος και της στοάς χρησιμεύει ως δάπεδο εργασίας για την όρυξη της επόμενης κεκλιμένης στοάς που θα προσβάλλει το αμέσως ανώτερο πάτωμα (Σχήμα 3.17).



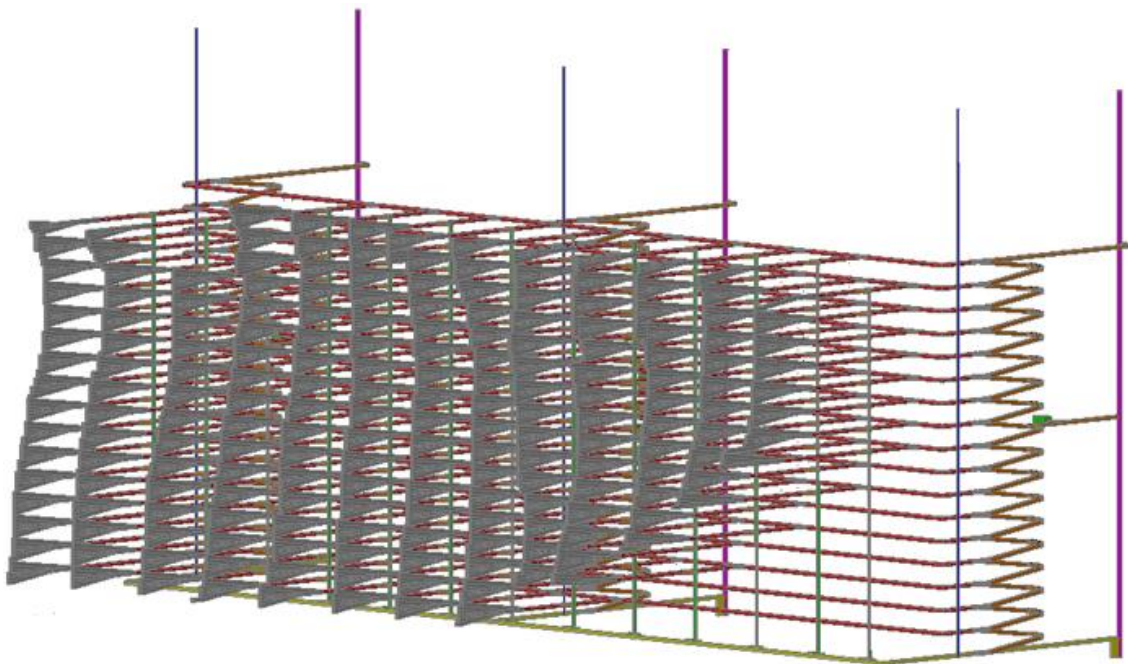
Σχήμα 3.17: Όρυξη ανώτερης εγκάρσιας στοάς προσβολής δεύτερου πατώματος (τομή κατά την κλίση του κοιτάσματος).

Η λιθογόμωση που θα χρησιμοποιηθεί στα μέτωπα του πατώματος θα είναι υγρή ενώ αυτή στις ράμπες ξηρή, αποτελούμενη από αδρανή υλικά και τέλματα μεταλλουργίας ή και εμπλουτισμού. Η παραπάνω διαδικασία συνεχίζεται μέχρις ότου να εξοφληθούν όλα τα πατώματα και το σύνολο των στοών προσβολής του ορόφου θα έχει την παρακάτω μορφή (Σχήμα 3.18). Στο Σχήμα 3.18 παρατηρείται με κόκκινο χρώμα η κύρια εγκάρσια στοά προσβολής, με πορτοκαλί χρώμα η ξηρή λιθογόμωση που τοποθετήθηκε στις ράμπες προσβολής και με γκρι η λιθογόμωση των πατωμάτων του εξοφλημένου ορόφου.

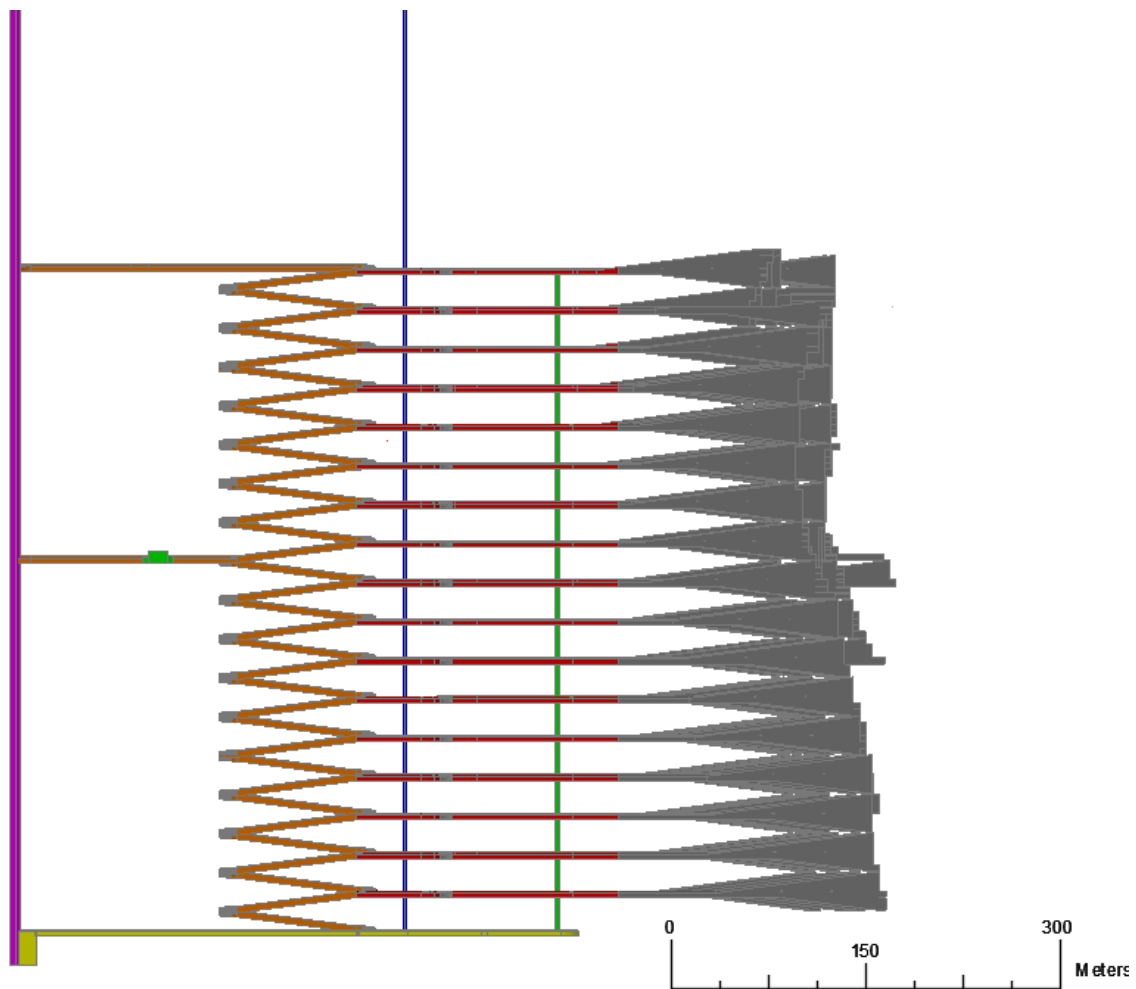


Σχήμα 3.18: Λιθογομωμένες στοές προσβολής ενός πλήρως εξοφλημένου ορόφου (τομή κατά την κλίση του κοιτάσματος).

Στο Σχήμα 3.19 παρατηρείται το σύνολο των έργων προπαρασκευής σε τρισδιάστατη απεικόνιση και στο Σχήμα 3.20 μια τομή κατά την κλίση του κοιτάσματος.



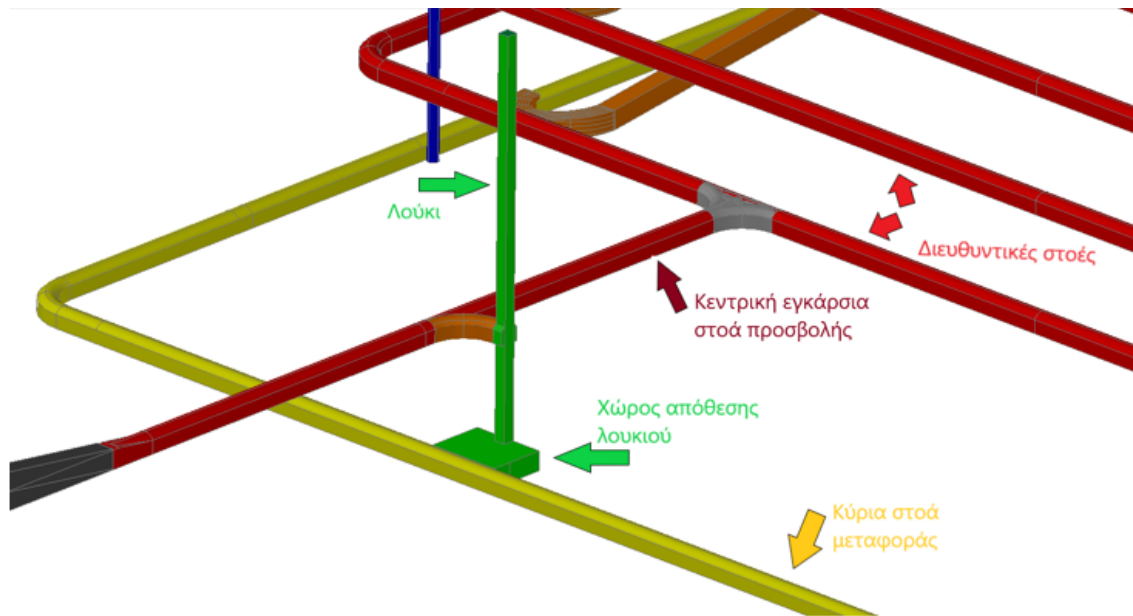
Σχήμα 3.19: Τρισδιάστατη απεικόνιση του συνόλου των στοών προσβολής της μεθόδου Drift n' fill.



Σχήμα 3.20: Εικόνα του συνόλου των στοών προσβολής της μεθόδου Drift n fill (τομή κατά την κλίση του κοιτάσματος)

Τα λούκια χρησιμεύουν αποκλειστικά στην μεταφορά μέσω βαρύτητας του μεταλλεύματος από το επίπεδο που εξορύχθηκε στην κύρια στοά μεταφοράς. Η κατασκευή των λουκιών μπορεί να γίνει κατακόρυφα με την μέθοδο raise boring (χωρίς χρήση εκρηκτικών αλλά με μεγάλο κόστος) ή με την χρήση των γνωστών μεθόδων Jora lift ή Alimak καθώς οι προϋποθέσεις (ύψος όρυξης μεταξύ στοών και σημεία πρόσβασης) και για τις δύο μεθόδους πληρούνται. Σαφώς δεν πρέπει να παραληφθεί ότι και η μέθοδος VCR είναι κατάλληλη και, προτιμότερη για την προαναφερθείσα εργασία καθώς προσφέρει περισσότερη ασφάλεια και αποτελεσματικότητα. Τα έργα αυτά εκτείνονται ανοδικά σταδιακά με την εξέλιξη της εξόρυξης. Διαθέτουν τετραγωνικές διατομές με εμβαδόν 9 m^2 και στον πυθμένα τους υπάρχει ένας διαμορφωμένος χώρος απόθεσης του μεταλλεύματος που συνδέεται με την κύρια στοά μεταφοράς. Ο χώρος αυτός έχει διαστάσεις 25 m μήκος, 20

m πλάτος και 5 m ύψος και σε αυτόν λειτουργούν φορτωτές που φορτώνουν το μέταλλευμα στα φορτηγά με προορισμό τα φρέατα (Σχήμα 3.21).

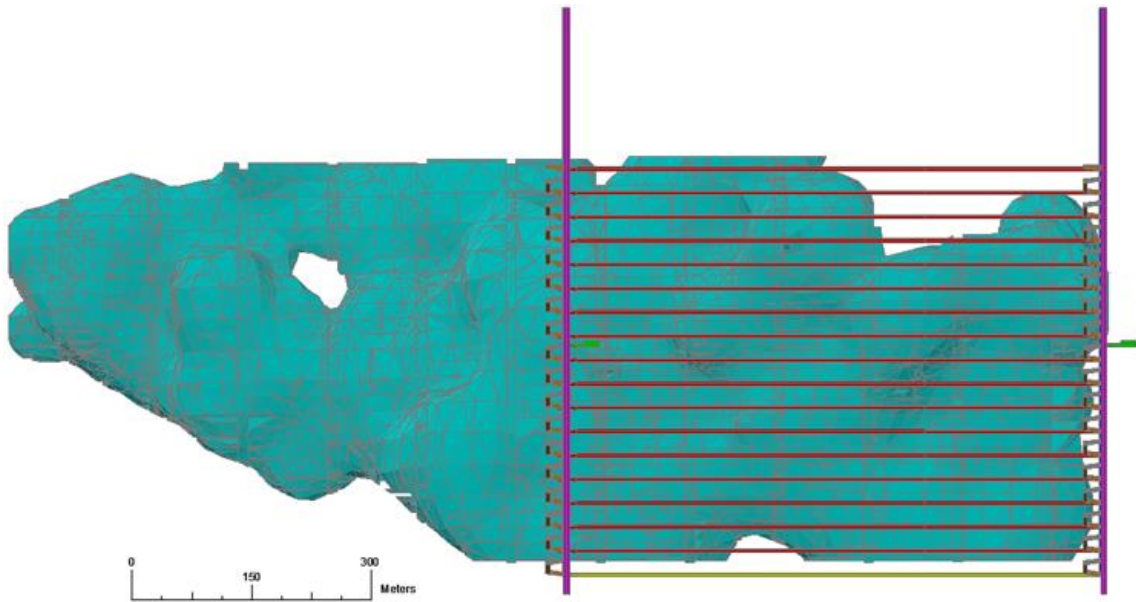


Σχήμα 3.21: Τρισδιάστατη απεικόνιση ενός λουκιού και του χώρου απόθεσης στην κύρια στοά μεταφοράς.

3.2.3 Έργα ανάπτυξης και εφαρμογή της μεθόδου Drift n' Fill

Τα έργα ανάπτυξης της μεθόδου drift n fill είναι ουσιαστικά οι στοές («φέτες») που ορύσσονται εντός του κοιτάσματος σε κάθε πάτωμα, εξορύσσοντας το σταδιακά. Η αλληλουχία εξόρυξης σχεδιάζεται με τρόπο ώστε κάθε μέτωπο που εξορύσσεται να περιβάλλεται από φυσική όσο το δυνατό υποστήριξη και από τεχνητή (λιθογόμωση) ενός ήδη εξοφλημένου μετώπου. Ο σχεδιασμός της μεθόδου προβλέπει την ύπαρξη ορόφων ύψους 30 μέτρων, μήκους κατά την παράταξη του κοιτάσματος 100 μέτρων και βάθους αναλόγως το πάχος του κοιτάσματος. Μεταξύ των ορόφων κατά την κατακόρυφο έννοια αφήνεται ένας στύλος προστασίας μήκους όσο το πάχος του κοιτάσματος, πλάτους 12 μέτρων και ύψους αντίστοιχο αυτού του κοιτάσματος.

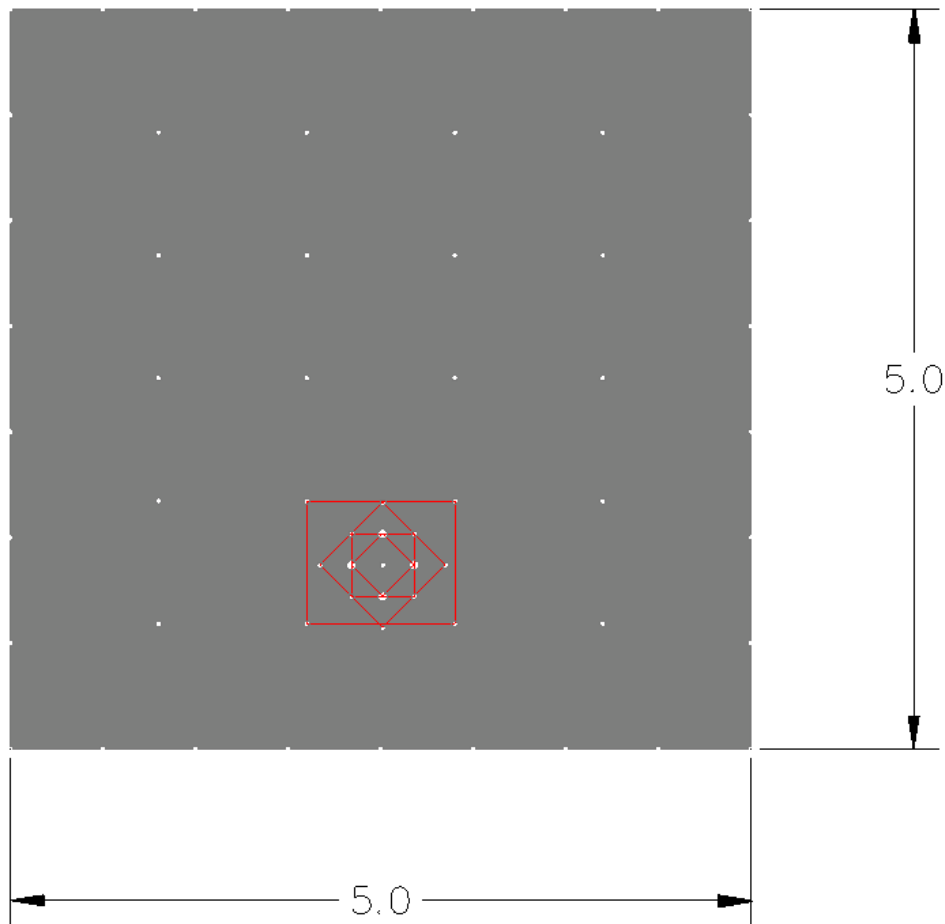
Η εκμετάλλευση σχεδιάζεται να εκκινήσει από το κατώτερο άκρο του κοιτάσματος με κατεύθυνση ανοδική και οριζόντια ταυτόχρονα. Για τον σκοπό αυτό, θα ορυχθούν τα πρώτα δύο φρέατα, οι κεκλιμένες ράμπες εναλλασσόμενης κατεύθυνσης και οι διευθυντικές στοές μαζί με την κύρια στοά μεταφοράς (Σχήμα 3.22).



Σχήμα 3.22: Κατασκευή αρχικών έργων προσπέλασης (τομή κατά την παράταξη).

Τα λούκια θα κατασκευάζονται και θα προηγούνται σε έναν βαθμό του επιπέδου των εξορυσσόμενων μετώπων. Μόλις η εξόρυξη προσεγγίσει το μέσον του κοιτάσματος θα έχει κατασκευαστεί και το τρίτο φρέαρ με την κεκλιμένη ράμπα του και τα συναφή έργα. Καθώς το κοιτάσμα έχει μεγάλες διαστάσεις, απαιτούνται πολλά κοστοβόρα έργα προσπέλασης – προπαρασκευής, με αποτέλεσμα να είναι αδύνατη η διάθεση ενός μεγάλου κεφαλαίου που θα καλύψει πλήρως όλα τα έργα προτού ξεκινήσει η παραγωγή. Συνεπώς, τα έργα γίνονται σταδιακά ώστε μόλις είναι δυνατόν να εκκινήσει η παραγωγή να μπορεί να συνεισφέρει οικονομικά στην κατασκευή των υπόλοιπων έργων για την επέκταση της εκμετάλλευσης.

Τα μέτωπα χωρίζονται σε τμήματα που θα εξορυχθούν με συγκεκριμένη σειρά. Πιο συγκεκριμένα, ένα πάτωμα χωρίζεται σε 2 πάνελ με την όρυξη μιας κεντρικής εγκάρσιας στοάς, από την οποία θα εκκινεί η όρυξη στο εκάστοτε μέτωπο. Τα LHD's με την σειρά τους θα μεταφέρουν το μέταλλευμα στο σημείο απόρριψης στα λούκια και θα επιστρέφουν για νέα φόρτωση. Τα μέτωπα έχουν διαστάσεις 5 m x 5 m και έναν τυπικό κάναβο διατρημάτων (Σχήμα 3.23). Το μήκος των μετώπων είναι 47.5 μέτρα κατά κύριο λόγο ενώ στις εξορύξεις που γίνονται στα όρια (περίβλημα) του κοιτάσματος με το περιβάλλον πέτρωμα το μήκος δύναται να είναι μικρότερο.

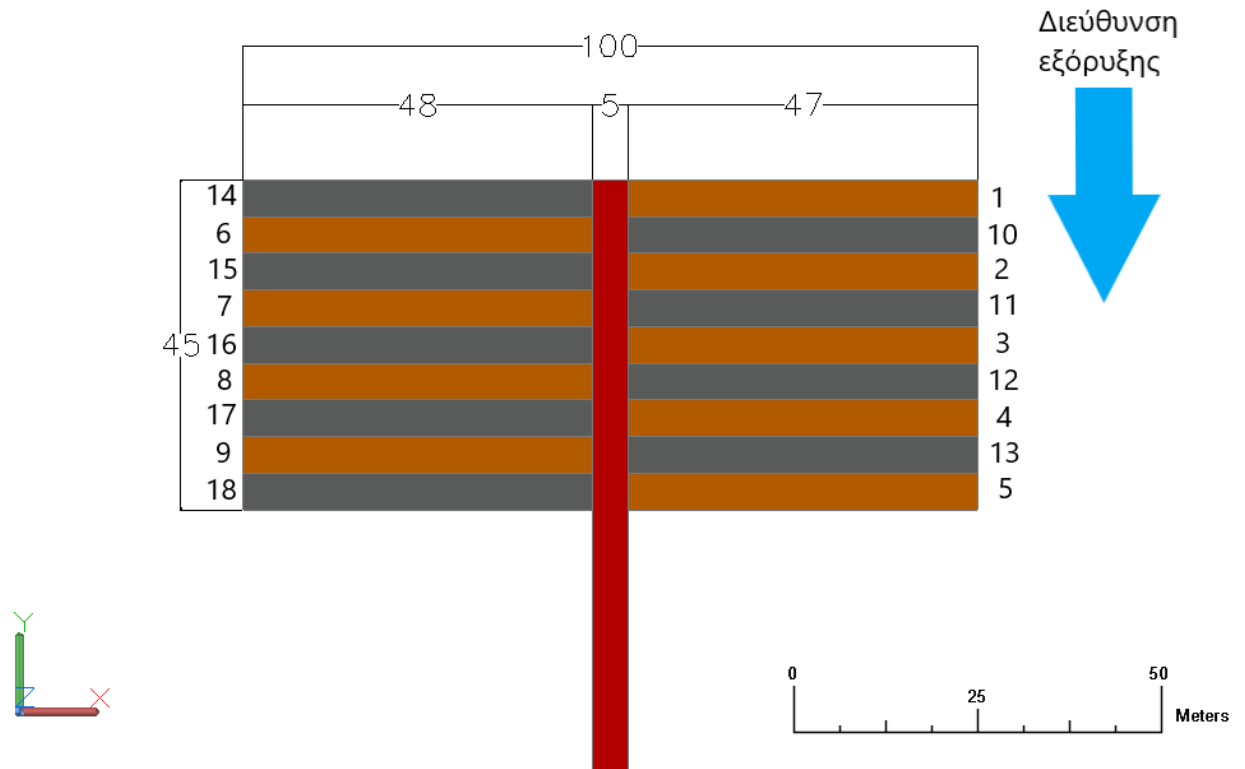


Σχήμα 3.23: Διαστάσεις μετώπων και μέθοδος όρυξης διατηρημάτων ανατίναξης.

Σε όλα τα μέτωπα της μεθόδου τα διατηρήματα ορύσσονται οριζόντια. Η πρακτική αυτή προσφέρει υψηλή ασφάλεια με μειωμένη όμως παραγωγικότητα. Πιο συγκεκριμένα, το ύψος του μετώπου διατηρείται χαμηλό και ελέγχεται καλύτερα η οροφή. Στον αντίποδα, δεν είναι εφικτή η ταυτόχρονη διάτρηση και αποκομιδή, ενώ ο όγκος του εξορυσσόμενου πετρώματος είναι περιορισμένος καθώς το μήκος του ανατινασσόμενου τμήματος ισούται με το μήκος διάτρησης (Εξαδάκτυλος, 2005). Η εκμετάλλευση αρχίζει από το τέλος του πατώματος με διεύθυνση εξόρυξης προς τα έργα προσπέλασης. Πάντα γίνεται μια εξόρυξη μετώπου ανά φορά και ύστερα ακολουθεί η άμεση λιθογόμωση του. Το μήκος προχώρησης ισούται με 3 μέτρα και συνεπώς παραλαμβάνονται περίπου 75 m^3 υλικού ανά ανατίναξη. Ένα τσιμεντένιο φράγμα τοποθετείται στην είσοδο του κάθε μετώπου ώστε αυτό να σφραγιστεί. Η λιθογόμωση απαιτεί χρόνο μέχρι να στερεοποιηθεί και είναι αδύνατο να γίνει η απόληψη ενός διπλανού μετώπου.

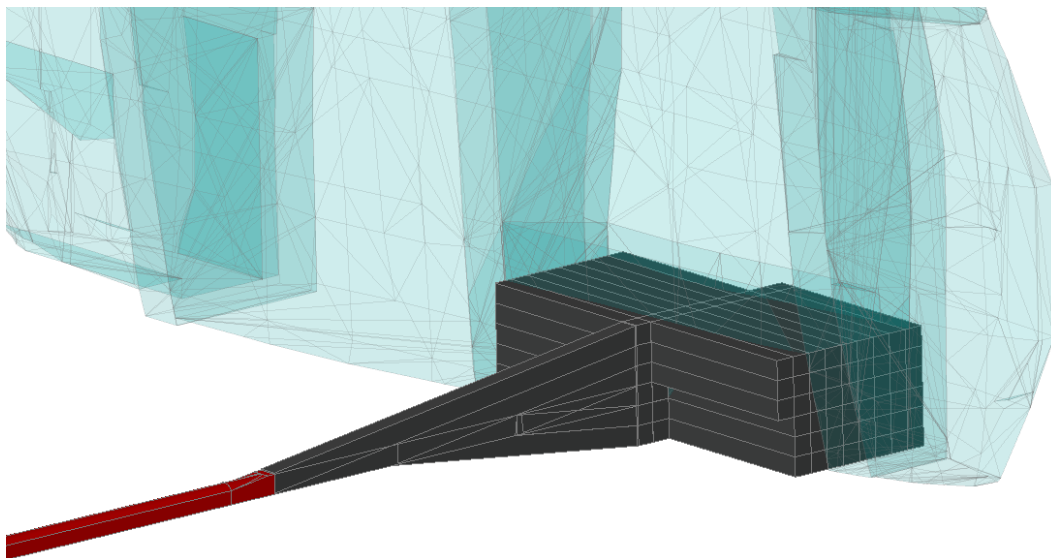
Συνεπώς, η εκμετάλλευση συνεχίζεται σε μέτωπο από το δεύτερο πάνελ και γίνονται εναλλαγές με σκοπό να δίνεται χρόνο στην λιθογόμωση του εκάστοτε μετώπου και

για την διασφάλιση της στατικής επάρκειας του πατώματος. Στο [Σχήμα 3.24](#) παρατηρείται η σειρά εκμετάλλευσης των μετώπων σε ένα τυχαίο πάτωμα διαστάσεων 45 m x 100 m.



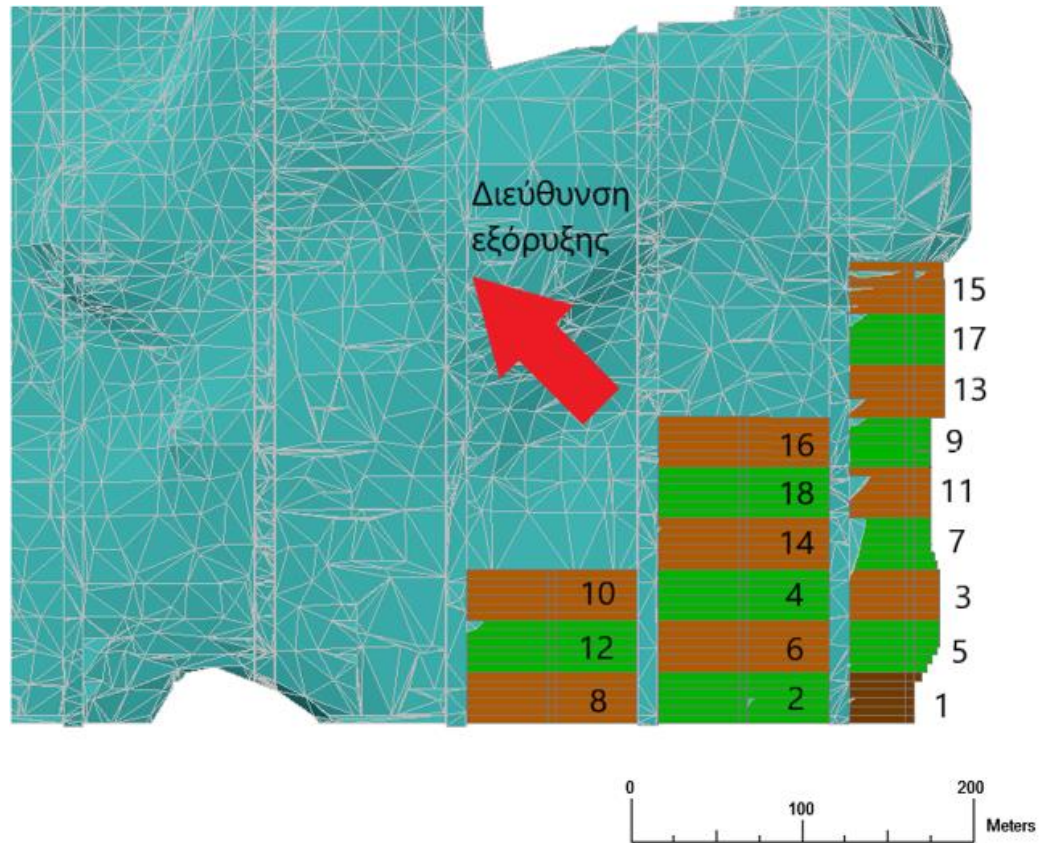
Σχήμα 3.24: Σειρά εξόρυξης μετώπων σε ένα τυχαίο πάτωμα (Κάτοψη).

Η διαδικασία συνεχίζεται για κάθε πάτωμα ανοδικά μέχρι την εξόφληση ενός ορόφου ([Σχήμα 3.25](#)).



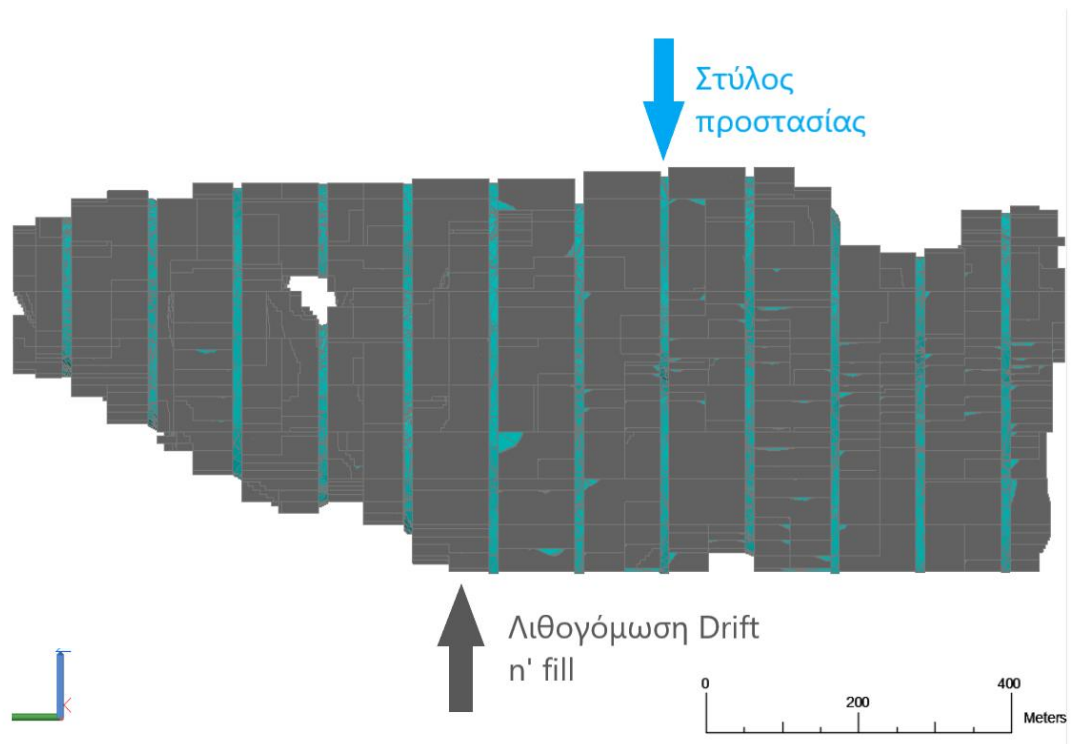
Σχήμα 3.25: Τρισδιάστατη απεικόνιση ενός εξοφλημένου ορόφου της μεθόδου Drift n' fill.

Ύστερα η εκμετάλλευση συνεχίζεται πρώτα σε διπλανό όροφο οριζόντια και μετά κάθετα, σε όροφο ανώτερο του πρώτου. Στο [Σχήμα 3.26](#) περιγράφεται η σειρά της εξόρυξης των ορόφων όπου με κόκκινο χρώμα αναπαρίσταται ο πρώτος όροφος που θα εξοφληθεί.



Σχήμα 3.26: Σειρά εκμετάλλευσης ορόφων της μεθόδου Drift n' fill (τομή κατά την παράταξη).

Η λιθογόμωση που θα χρησιμοποιηθεί στην μέθοδο θα είναι τσιμεντοπολφός. Πιο συγκεκριμένα, η υγρή λιθογόμωση θα είναι ένα μίγμα αδρανών και τσιμέντου και θα μεταφέρεται διαμέσου ειδικής κατασκευής σωληνώσεων με διάμετρο 100 mm έως 150 mm από την επιφάνεια στα μέτωπα ([Εξαδάκτυλος, 2005](#)). Λόγω του μεγέθους της κλίμακας της εκμετάλλευσης, θα εγκατασταθεί μια πλήρης μονάδα παραγωγής λιθογόμωσης στην επιφάνεια. Η ολοκλήρωση της εκμετάλλευσης με την μέθοδο Drift n fill δημιουργεί μια εικόνα όπου όλοι οι όροφοι έχουν εξοφληθεί και έχουν λιθογομωθεί. Διακρίνονται οι στύλοι (με κυανό χρώμα) που έχουν αφαιρεθεί ώστε να εξορυχθούν με την μέθοδο VCR ([Σχήμα 3.27](#)).



Σχήμα 3.27: Τομή κατά την παράταξη του κοιτάσματος με ολοκληρωμένη την μέθοδο Drift n' fill.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί, πως τα λούκια είναι ουσιαστικά «ενσωματωμένα» στις κεντρικές εγκάρσιες στοές προσβολής της Drift n' fill και όχι στις διευθυντικές. Η επόμενη μέθοδος που θα εφαρμοστεί (VCR) θα αξιοποιήσει στο έπακρο και ανεξαιρέτως όλα τα προπαρασκευαστικά έργα και τα έργα προσπέλασης που έγιναν προηγουμένως. Επομένως το μέταλλευμα που θα εξορυχθεί με τη νέα μέθοδο πρέπει να οδηγείται πάλι στην κύρια στοά μεταφοράς, μέσω των λουκιών. Επίσης, στο [Παράρτημα Α](#): Τελικές τομές παρατίθενται τα σχέδια της μεθόδου Drift n' Fill σε τελική μορφή.

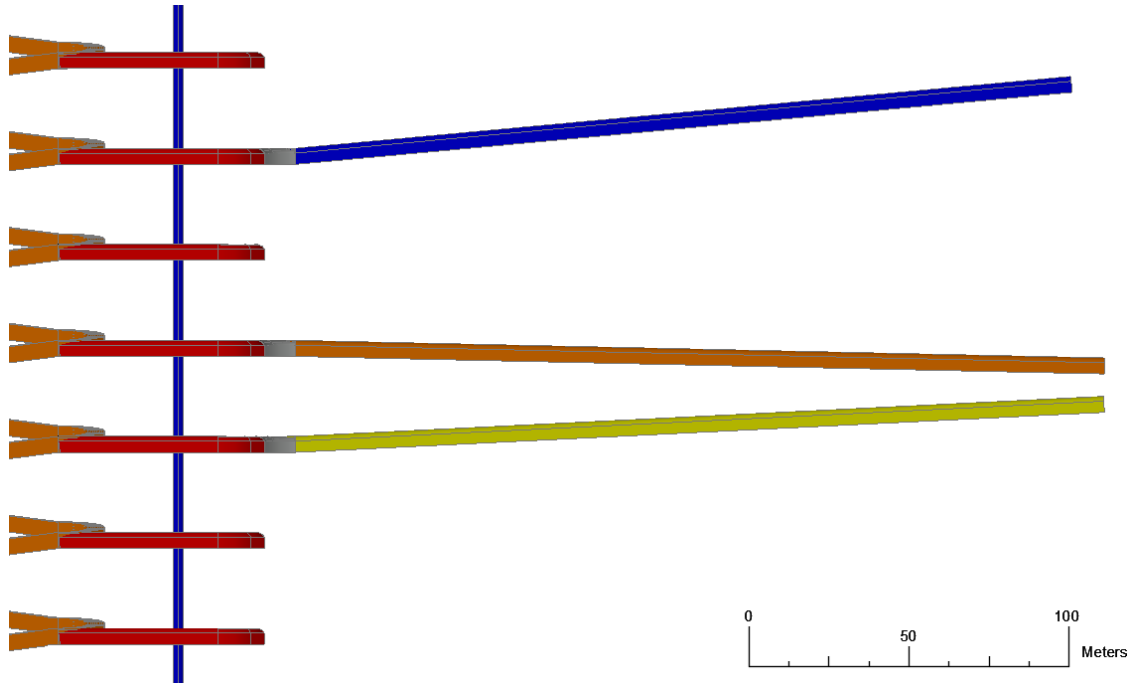
3.3 Σχεδιασμός μεθόδου VCR

Σε αυτήν την ενότητα θα περιγραφεί ο σχεδιασμός της μεθόδου VCR αναλυτικά με όλα τα σχέδια. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφεται πως αναπτύσσεται η μέθοδος σε ένα μέτωπο και πως αυτό εξελίσσεται σε όλη την έκταση του κοιτάσματος. Σημειώνεται ότι τα έργα προσπέλασης της μεθόδου ταυτίζονται με έργα της μεθόδου Drift n' fill όπως περιγράφονται στην [υποενότητα 3.2.1](#).

3.3.1 Έργα προπαρασκευής VCR

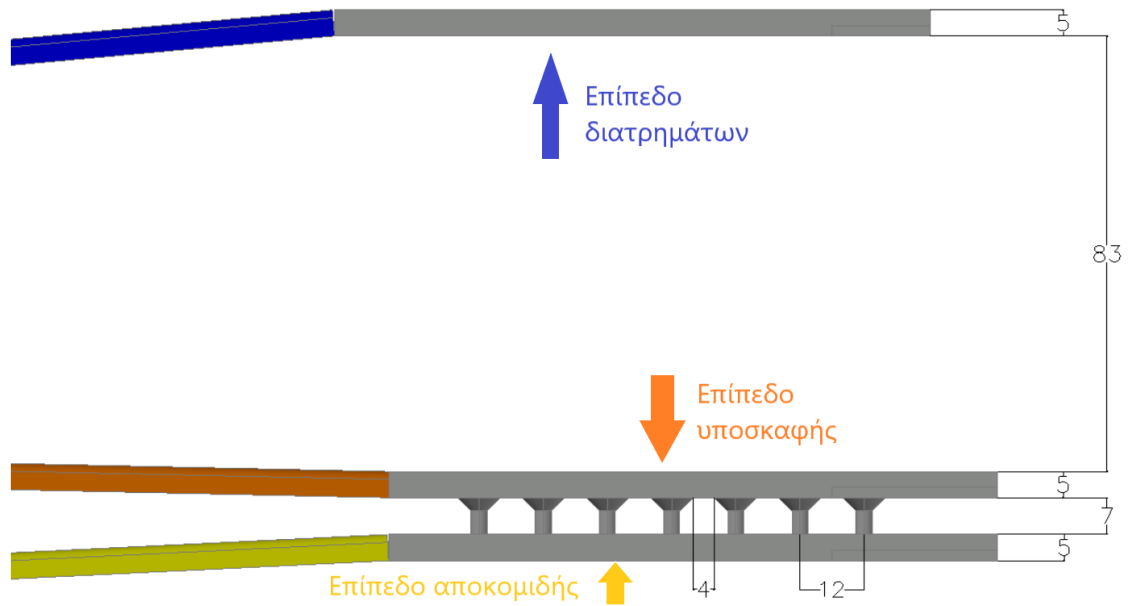
Τα έργα προπαρασκευής περιλαμβάνουν 3 βασικές στοές και χοάνες διαμοιρασμού του μεταλλεύματος. Από τις ήδη υπάρχουσες διευθυντικές στοές, ορύσσονται 3 κεκλιμένες στοές προσβολής εγκάρσια ως προς το κοίτασμα με κυμαινόμενη αρνητική ή

θετική κλίση από 5% - 13% ανάλογα την διευθυντική στοά προέλευσης (Σχήμα 3.28). Στο Σχήμα 3.28 παρατηρείται με μπλε χρώμα η κεκλιμένη στοά προσβολής του επίπεδου διατρημάτων, με πορτοκαλί χρώμα η κεκλιμένη στοά προσβολής του επίπεδου υποσκαφής και με κίτρινο χρώμα η κεκλιμένη στοά προσβολής του επίπεδου αποκομιδής.



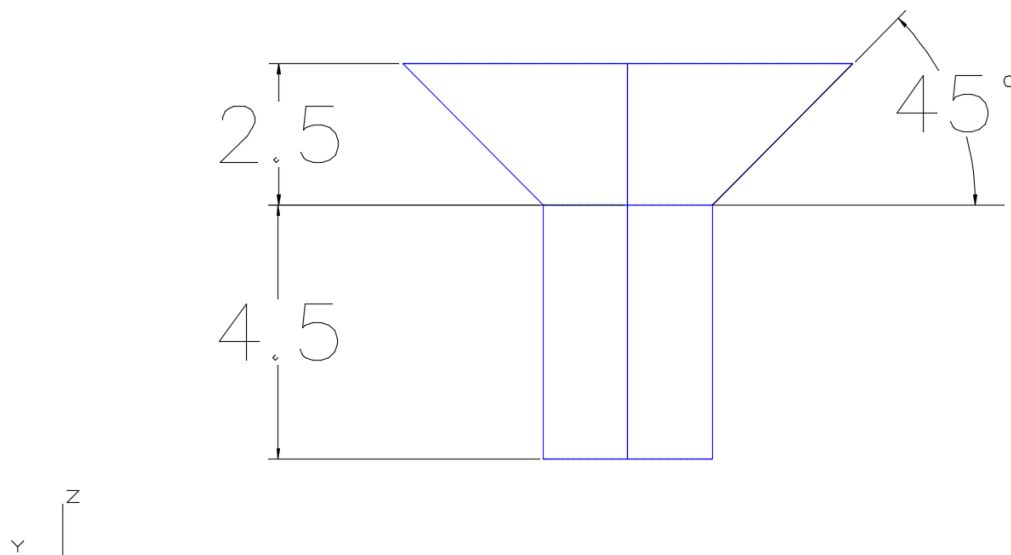
Σχήμα 3.28: Στοιές προσβολής σε ένα τυχαίο μέτωπο VCR (τομή κατά την κλίση του κοιτάσματος).

Στο Σχήμα 3.28 παρατίθεται ένα παράδειγμα ενός τυχαίου μετώπου όπου αγνοούνται τα προηγούμενα έργα (λούκια, λιθογομωμένες στοές Drift n' fill). Τα έργα αυτά κανονικά παρεμβάλλονται και δεν επιτρέπουν την προβολή των έργων VCR του παραδείγματος. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων οι στοές είναι κεκλιμένες καθώς οι διευθυντικές στοές δεν έχουν προσαρμοστεί για την εξυπηρέτηση της μεθόδου VCR. Οι στοές προσβολής καταλήγουν στις βασικές στοές (επίπεδα) που ορύσσονται εντός του κοιτάσματος κάθετα ως προς τη παράταξη και έχουν πλάτος 12 μέτρα (όσο και του στύλου προστασίας). Το μήκος τους εξαρτάται από το πλάτος του κοιτάσματος, ενώ το ύψος τους είναι 5 μέτρα. Η ανώτερη στοά (επίπεδο διατρημάτων) έχει υψομετρική διαφορά 83 μέτρων από την στοά υποσκαφής, ενώ η στοά υποσκαφής (επίπεδο υποσκαφής) έχει υψομετρική διαφορά από την κατώτερη στοά (επίπεδο αποκομιδής) 7 μέτρα (Σχήμα 3.29).

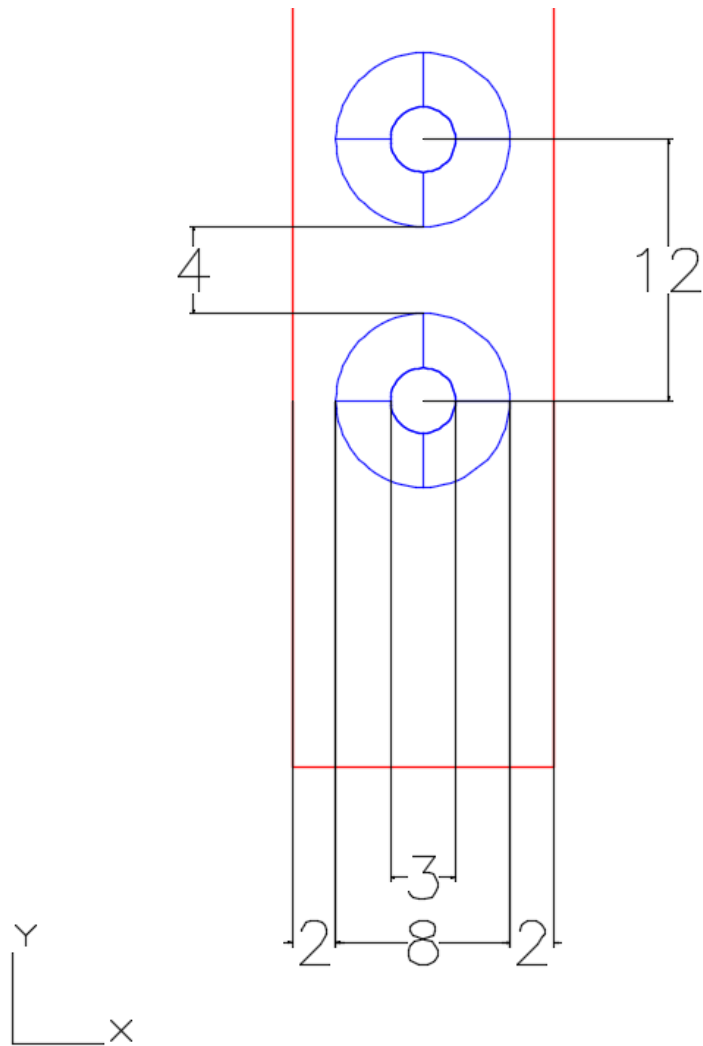


Σχήμα 3.29: Έργα προπαρασκευής ενός μετώπου VCR (τομή κατά την κλίση του κοιτάσματος).

Ανάμεσα στις στοές υποσκαφής και αποκομιδής, ορύσσονται ανιόντα διατρήματα με τα οποία θα κατασκευαστούν οι χοάνες απόληξης. Οι χοάνες έχουν σχεδιαστεί με κυλινδρική απόληξη διαμέτρου 3 μέτρων και ύψους 4.5 μέτρων ενώ το ανώτερο τμήμα αποτελείται από τοιχώματα με κλίση 45° και διάμετρο 8 μέτρων (Σχήμα 3.30). Μεταξύ των παρειών των στοών και του «στομίου» των χοανών υπάρχει απόσταση 2 μέτρων. Η απόσταση των χοανών μεταξύ τους είναι τέσσερα μέτρα (Σχήμα 3.31).

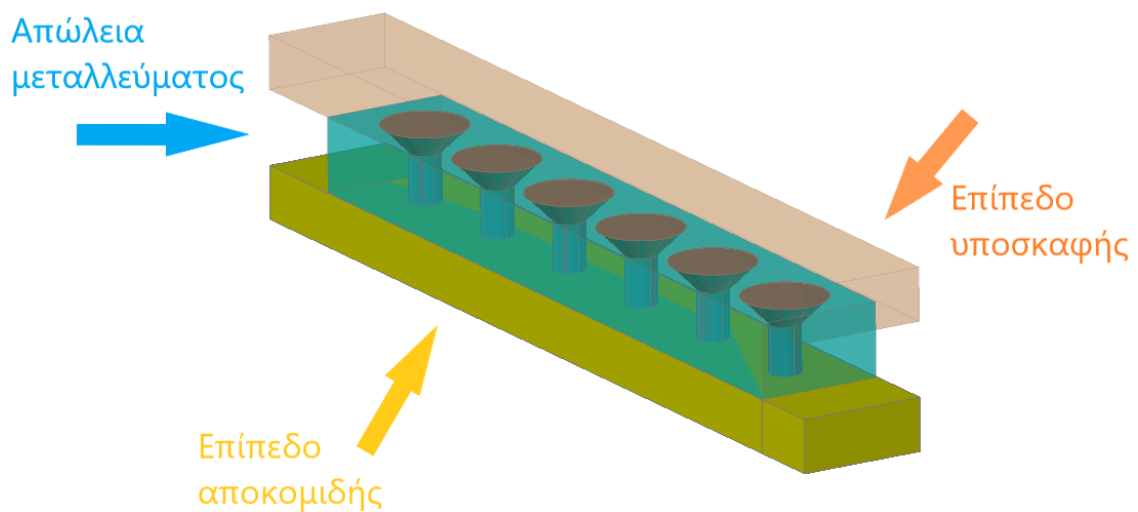


Σχήμα 3.30: Πρόσωση και διαστάσεις μιας χοάνης.



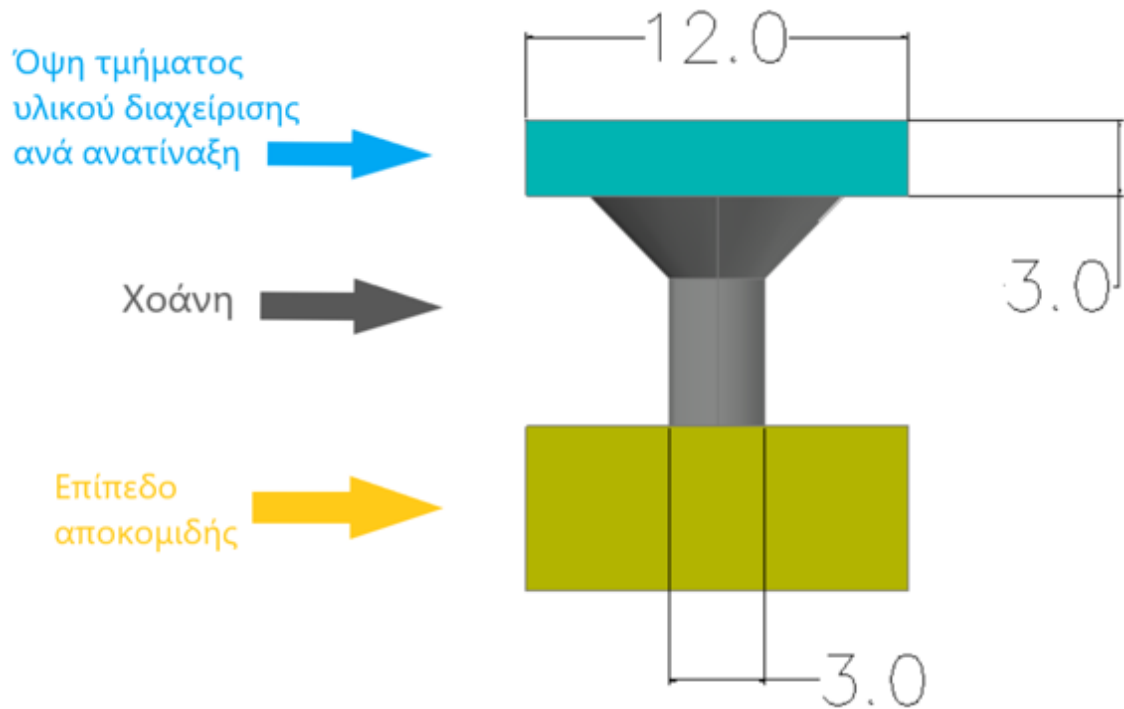
Σχήμα 3.31: Κάτοψη - απόσπασμα επιπέδου υποσκαφής με διαστάσεις χοανών.

Το πέτρωμα που υπάρχει μεταξύ των χοανών χρησιμεύει ως υποστήριξη και θεωρείται απώλεια στην μέθοδο καθώς δεν είναι εφικτό να ανακτηθεί (Σχήμα 3.32).



Σχήμα 3.32: Απώλειες της μεθόδου VCR στο επίπεδο χοανών.

Κάθε χοάνη έχει σχεδιαστεί ώστε να παραλαμβάνει περίπου 432 m^3 ($12 \text{ m} \times 12 \text{ m} \times 3 \text{ m}$) θραυσμένου υλικού με κάθε ανατίναξη (Σχήμα 3.33).



Σχήμα 3.33: Φορτίο θραυσμένου υλικού που αναλαμβάνει μια χοάνη.

Πολλοί παράγοντες συμβάλλουν στον καθορισμό των παραπάνω διαστάσεων. Όσον αφορά την απόσταση μεταξύ των χοανών, κατά τον Laubscher (1994), οι παράγοντες που την επηρεάζουν είναι:

- Ο θρυμματισμός.
- Το μέγεθος εκσκαφής.
- Οι επαγόμενες τάσεις.
- Η μηχανική αντοχή του πετρώματος.
- Οι γωνίες τριβής των κατακριμνηζόμενων σωματιδίων.

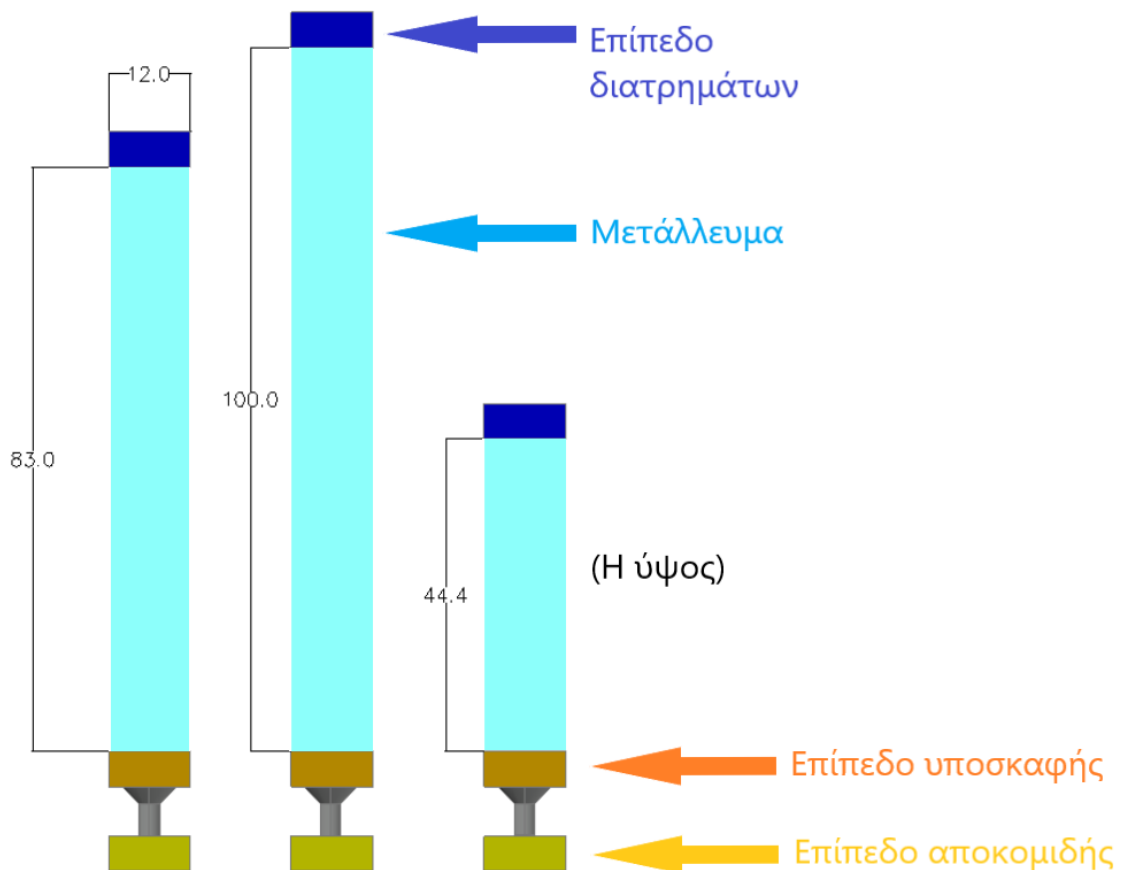
Γενικότερα ισχύει ότι όσο μεγαλύτερο το μέγεθος των σωματιδίων, τόσο μεγαλύτερη πρέπει να είναι η απόσταση μεταξύ των χοανών και αντίστροφα (Gertch & Bullock, 1998). Ταυτόχρονα, η γωνία κλίσης των τοιχωμάτων της χοάνης πρέπει να είναι το λιγότερο 45° μοίρες ώστε να ευνοείται η ελεύθερη κίνηση των σωματιδίων μέσω βαρύτητας προς την στοά αποκομιδής (Laubscher, 1994). Εν κατακλείδι, η στοά αποκομιδής έχει μήκος εξαρτώμενο από το πλάτος του κοιτάσματος, πλάτος 12 μέτρα και ύψος 5 μέτρα.

3.3.2 Έργα ανάπτυξης και εφαρμογή της μεθόδου VCR

Στα έργα ανάπτυξης λογίζονται τα διατρήματα μεγάλου μήκους που ορύσσονται από το επίπεδο διατρημάτων ως το επίπεδο υποσκαφής. Όπως αναφέρθηκε στην υποενότητα 2.1.10, σε αυτόν τον σχεδιασμό, επιλέχθηκε το διατρητικό DU – 431 της εταιρείας Sandvik. Το συγκεκριμένο διατρητικό μπορεί να διατρήσει σε μέγιστο βάθος 100 μέτρων. Η διάτρηση σε αυτό το βάθος είναι επιρρεπής σε σφάλματα. Το ύψος (μήκος διάτρησης) των μετώπων κατηγοριοποιείται σε 3 περιπτώσεις (Σχήμα 3.34):

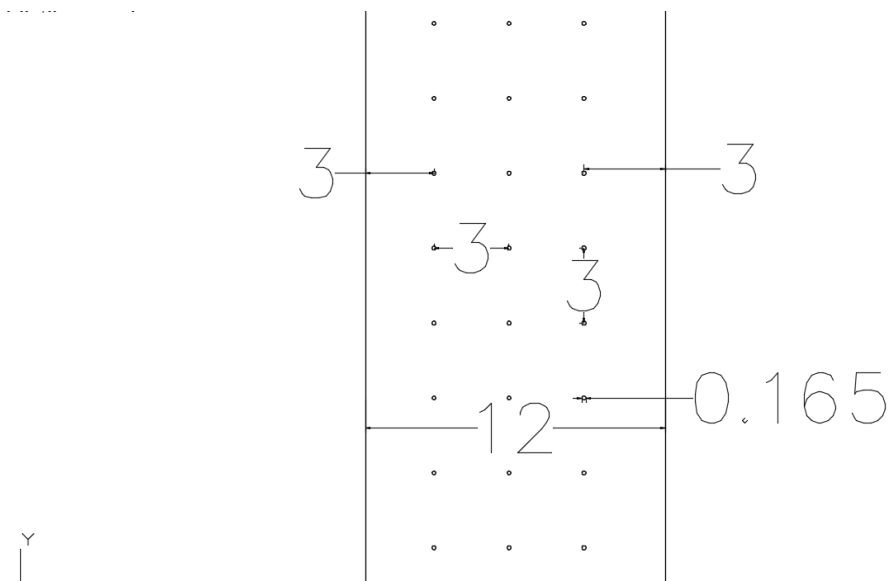
- Ύψος μετώπου ίσο με 83 μέτρα (πλειοψηφία των μετώπων).
- Ύψος μετώπου ίσο με 100 μέτρα (Συνολικά 6 μέτωπα).
- Μέσο ύψος 6 μετώπων με διάφορα ύψη.

Ο λόγος που συμβαίνει αυτό, είναι λόγω των γεωμετρικών ιδιοτήτων του κοιτάσματος και του γεγονότος πως έγινε μια προσπάθεια να βρίσκονται όλα τα έργα προπαρασκευής της VCR, στο ίδιο περίπου επίπεδο μεταξύ τους. Στα υπόγεια έργα αποφεύγεται η όρυξη πολλών έργων σε διάφορα ύψη δημιουργώντας ανασφάλεια και φόβους μιας πιθανής κατάρρευσης. Είναι θεμιτή κατά κύριο λόγο μια συμμετρία μεταξύ όλων των έργων και στο πλαίσιο αυτό σχεδιάστηκαν όλα τα έργα της παρούσας εργασίας.

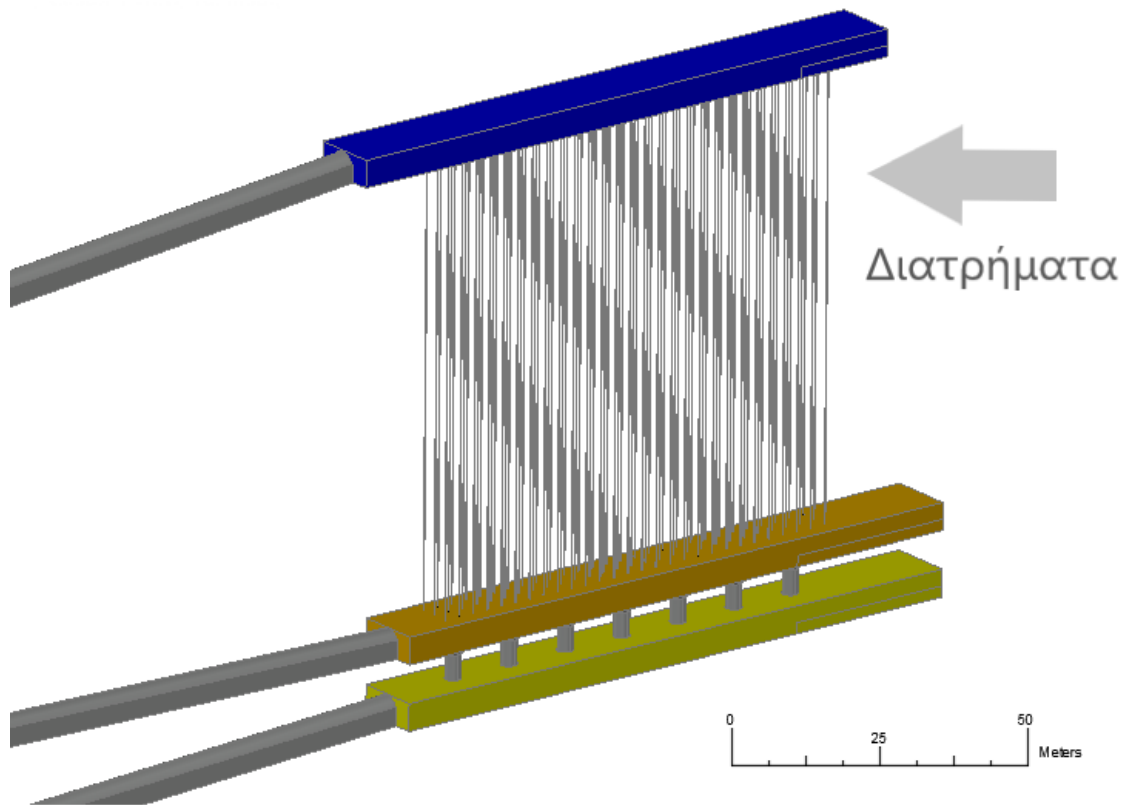


Σχήμα 3.34: Σύγκριση των τριών κατηγοριών μετώπων που υπάρχουν στην εκμετάλλευση VCR (πρόσοψη).

Λαμβάνοντας την παραδοχή πως το μέγιστο σφάλμα διάτρησης είναι 1%, ο σχεδιασμός του κάναβου ανατίναξης έχει αποστάσεις διατρημάτων 3 m x 3 m (Σχήμα 3.35). Παράλληλα, στο Σχήμα 3.36 παρουσιάζεται μια τρισδιάστατη απεικόνιση του συνόλου των διατρημάτων σε ένα μέτωπο.

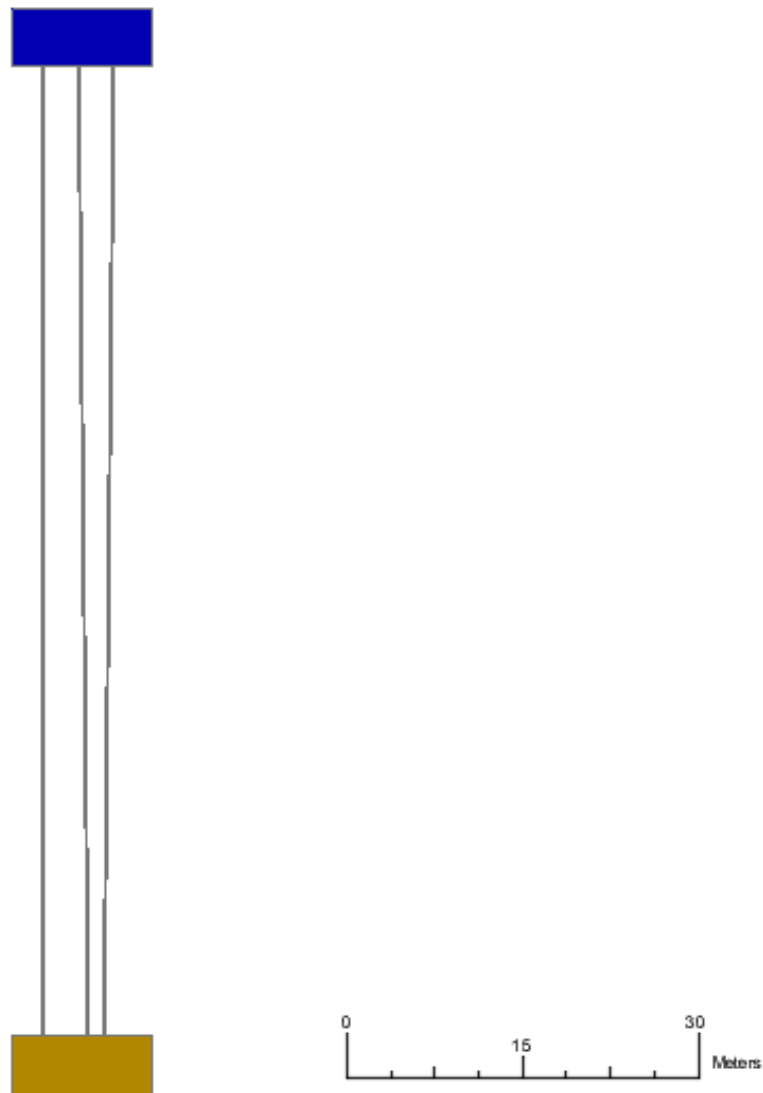


Σχήμα 3.35: Κάτοψη - απόσπασμα επιπέδου διατρημάτων με διαστάσεις του κάναβου διάτρησης.



Σχήμα 3.36: Τρισδιάστατη απεικόνιση κατακόρυφων διατρημάτων σε ένα μέτωπο.

Με αυτόν τον τρόπο, στο πιο δυσμενές σενάριο, σε μέτωπο 100 μέτρων, όπου τα διατρήματα συγκλίνουν σε μέγιστο βαθμό μεταξύ τους, δεν θα τεμθούν, διατηρώντας έτσι την αποτελεσματικότητα της ανατίναξης (Σχήμα 3.37).



Σχήμα 3.37: Σχεδιασμός με υπόθεση σύγκλισης 2 διατρημάτων (μέγιστο αποδεκτό σφάλμα).

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενη ενότητα, η μέθοδος VCR εφαρμόζεται με την ανατίναξη διαδοχικών τμημάτων πετρώματος που εξαρτάται από την εξ (2.2). Η συγκεκριμένη σχέση θα χρησιμοποιηθεί ώστε να προσδιοριστεί αφενός το κατάλληλο ύψος τοποθέτησης της εκρηκτικής ύλης και αφετέρου το μήκος προχώρησης το οποίο, θα υποδείξει προσεγγιστικά το σύνολο των ανατινάξεων για την πλήρη εξόφληση των μετώπων των τριών προαναφερθέντων περιπτώσεων. Το εκρηκτικό που προτείνεται να χρησιμοποιηθεί είναι το εκρηκτικό γαλάκτωμα EM - EX (Σχήμα 3.38).



Σχήμα 3.38: Φυσίγγια εκρηκτικού γαλακτώματος EM – EX (Extraco S.A., 2023)

Το εκρηκτικό της εταιρείας σύμφωνα με το εγχειρίδιο της καθίσταται κατάλληλο για χρήση σε κάθε είδος ανατίναξης και ως μέσο έναυσης απαιτεί έναν κοινό πυροκροτητή Νο.8. Η πυκνότητα του εκρηκτικού είναι $1.2 \frac{gr}{cm^3}$ και εφόσον θεωρείται ότι θα χρησιμοποιηθεί σε μέτριας αντοχής μητρικό πέτρωμα, από τον **Πίνακας 2.1** θεωρούνται οι τιμές των παραμέτρων E και Δ_0 ίσες με 3.4 και 0.46 αντίστοιχα. Για την παρακάτω ανάλυση δεν διεξήχθησαν πραγματικές δοκιμές ανατινάξεων μικρής κλίμακας ώστε, να ακολουθηθεί η διαδικασία που περιεγράφηκε στην υποενότητα 2.1.2. Συνεπώς, ακολουθήθηκε μια διαφορετική αλληλουχία επίλυσης ενώ, η λήψη των προαναφερθέντων τιμών από τον **Πίνακας 2.1** έγινε στα πλαίσια παραδοχής. Αντικαθιστώντας τις τιμές αυτές στην [εξ. \(2.2\)](#) θα υπολογιστεί πρώτα το βέλτιστο ύψος τοποθέτησης της εκρηκτικής ύλης :

$$d_o = \Delta \cdot E \cdot \sqrt[3]{W_0} \rightarrow d_o = 0.46 \cdot 3.4 \cdot \sqrt[3]{W_0} \rightarrow$$

$$d_o = 1.564 \cdot \sqrt[3]{W_0}$$

Για να βρεθεί το βάρος του εκρηκτικού που θα χρησιμοποιηθεί, πρέπει να υπολογιστεί πρώτα ο όγκος γόμωσης ενός διατρήματος. Από την θεωρία ισχύει ότι το μήκος γόμωσης του διατρήματος είναι ίσο με 6 φορές την διάμετρο του τελευταίου. Το διάτρημα έχει τυποποιημένη διάμετρο ίση με $d = 165 \text{ mm}$ ή $d = 16.5 \text{ cm}$. Συνεπώς το

μήκος γόμωσης ισούται με $L = 6 \cdot 16.5 = 99 \text{ cm}$. Ο όγκος γόμωσης για ένα κυλινδρικό διάτρημα δίνεται από τον παρακάτω τύπο :

$$V = \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot L \quad (3.2)$$

Όπου:

- d : Διάμετρος διατρήματος
- L : Μήκος διατρήματος
- V : Όγκος κυλίνδρου

Αντικαθιστώντας στην εξ. (3.2) τις παραπάνω τιμές, είναι:

$$V = 3.14 \cdot \frac{16.5^2}{4} \cdot 99 = 21,158 \text{ cm}^3$$

Εφόσον ο όγκος γόμωσης ισούται με $V = 21,158 \text{ cm}^3$, το βάρος της εκρηκτικής ύλης ισούται με:

$$W_0 = 21,158 \text{ cm}^3 \cdot 1.2 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} = 25,389.6 \text{ gr} \approx 25.4 \text{ Kg} \text{ ή}$$

$$W_0 = 25.4 \cdot 2.2 = 55.858 \text{ lbs} \text{ εκρηκτικής ύλης ανά διάτρημα.}$$

Αρα αντικαθιστώντας στην εξ. (2.2), είναι :

$$\begin{aligned} d_o &= 1.564 \cdot \sqrt[3]{W_0} \Rightarrow d_o = 1.564 \cdot \sqrt[3]{55,858} \Rightarrow d_o = 1.564 \cdot 3.8 = 5.94 \text{ ft} \\ &= \frac{5.94}{3.28} \text{ m} \end{aligned}$$

$$d_o = 1.81 \text{ m}$$

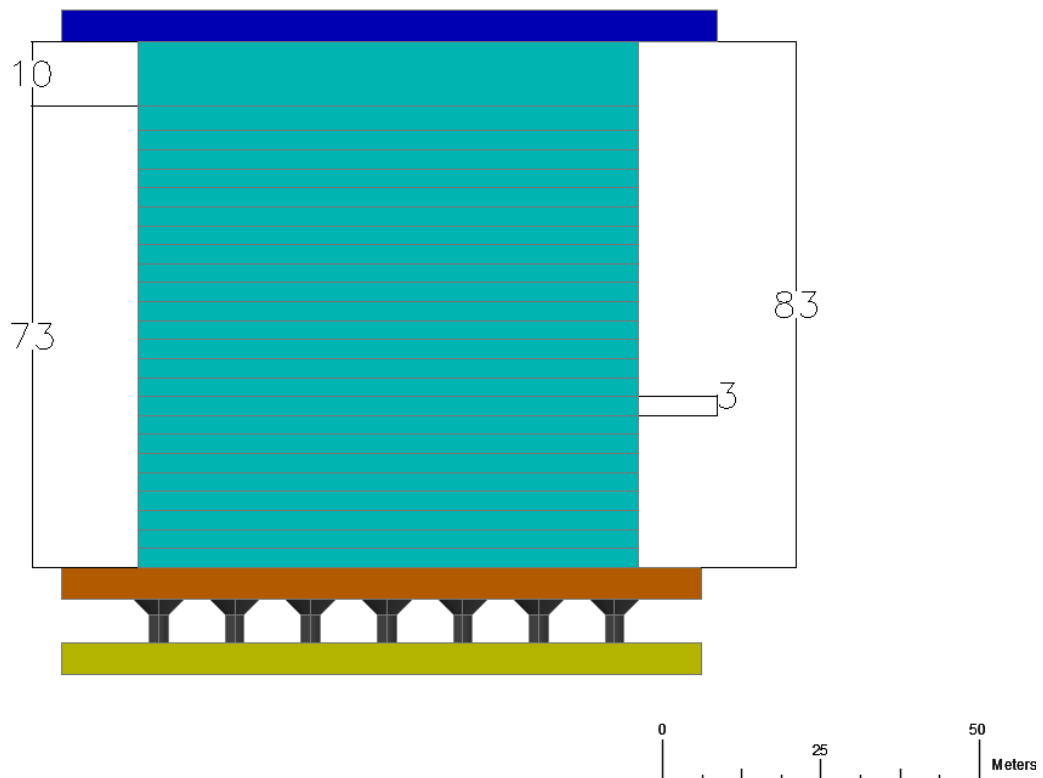
Το βέλτιστο βάθος d_o είναι ίδιο για όλα τα μέτωπα ανεξαρτήτως των διαστάσεων τους. Εν συνεχεία θα υπολογιστεί το σύνολο των ανατινάξεων και για τις τρεις περιπτώσεις.

- Περίπτωση 1^η : Μέτωπα με ύψος 83 μέτρα.

Εφόσον το βέλτιστο βάθος ισούται με $d_o = 1.81 \text{ m}$ θεωρείται ότι σε μια ανατίναξη η προχώρηση A (το ύψος του τμήματος πετρώματος που θα θρυμματιστεί) θα είναι

ίση με την ελάχιστη δυνατή τιμή προσαυξημένη κατά 0.7 λόγω των ιδιοτήτων του μητρικού πετρώματος. Ισχύει :

$$A = d_o + \frac{L}{2} + 0.7 = 1.81 \text{ m} + 0.99 \text{ m} + 0.7 \text{ m} \Rightarrow A = 3.0 \text{ m}.$$
 Το μήκος προχώρησης όπως και το βέλτιστο βάθος έχουν την ίδια τιμή για κάθε μέτωπο. Όλα τα τμήματα έχουν το σχήμα ενός ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου με ύψος όσο το μήκος προχώρησης (A), μήκος και πλάτος όσο αυτό του στύλου. Ένα μέτωπο για να εξορυχθεί πλήρως, χρειάζονται θεωρητικά $N = \frac{83}{3} \Rightarrow N = 27.6 = 28$ βήματα ανατινάξεων. Αν όμως ληφθεί υπόψη ότι τα τελευταία περίπου 10 μέτρα θα εξορυχθούν με μια ανατίναξη, τότε ο τελικός αριθμός ανατινάξεων ισούται με 25 (24+1) (Σχήμα 3.39).

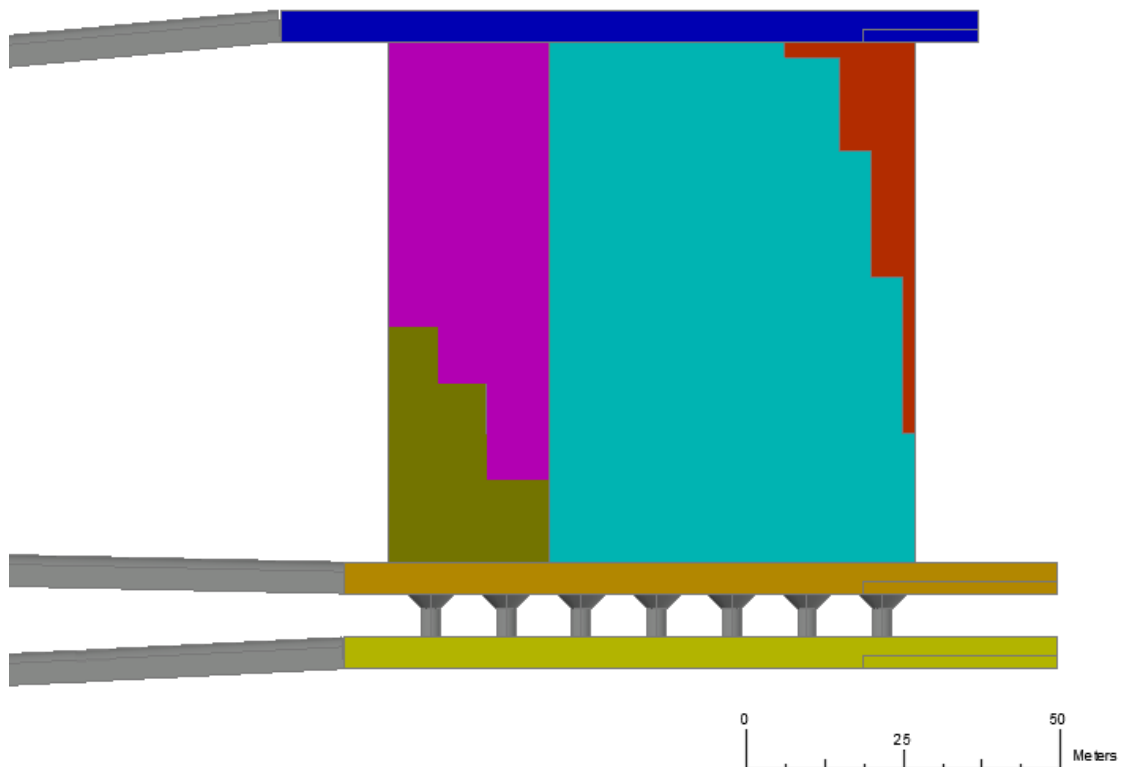


Σχήμα 3.39: Συνολικά τμήματα ανατινάξεων ενός μετώπου 83 μέτρων (τομή κατά την κλίση του κοιτάσματος).

Κάθε τμήμα έχει διαφορετικό όγκο ανατιναγμένου πετρώματος καθώς το κοίτασμα έχει ακανόνιστη γεωμετρία. Το σώμα του κοιτάσματος μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να έχει μεγαλύτερο από το μέσο πάχος (παρουσιάζει διόγκωση) ενώ σε ορισμένα σημεία μπορεί να στενεύει (παρουσιάζει «εσωτερικά βαθουλώματα»). Ως συνέπεια, στην

περίπτωση όπου ένα μέτωπο βρίσκεται σε περιοχή με αυξημένο πάχος κοιτάσματος (δηλαδή υπάρχει στείορο πέτρωμα κάτω από το μετάλλευμα) θα πρέπει να εξορυχθεί και στείορο πέτρωμα ώστε να παραληφθεί και το υπερκείμενο μετάλλευμα. Η πράξη αυτή συνεπάγεται την αύξηση του ποσοστού αραιώσης του εξορυχθέντος μεταλλεύματος.

Από την άλλη, στην περίπτωση ύπαρξης μιας «στένωσης» σε ένα μέτωπο (δηλαδή υπάρχει στείορο πέτρωμα πάνω από το μετάλλευμα) θα ορυχθούν κανονικά τα διατρήματα για την εξόρυξη όλου του μεταλλεύματος. Η διαφορά σε αυτή τη περίπτωση είναι ότι, στο σημείο όπου θα συναντάται το περιβάλλον πέτρωμα, δεν θα συνεχίζεται η γόμωση. Τα διατρήματα αυτά θα παραμείνουν απλήρωτα, δηλαδή «κούφια» και με το πέρασμα του χρόνου θα κλείσουν λόγω των υφιστάμενων τάσεων (Σχήμα 3.40). Στο Σχήμα 3.40 παρουσιάζεται ένα τυχαίο μέτωπο όπου με κυανό χρώμα αναπαρίσταται το κύριο σώμα του κοιτάσματος, ενώ με σκούρο κίτρινο χρώμα αναπαρίσταται το στείορο πέτρωμα που θα εξορυχθεί (αραιώση) ώστε, να ανακτηθεί το υπόλοιπο σώμα του κοιτάσματος που αναπαρίσταται με μωβ χρώμα και το περιβάλλον πέτρωμα που θα διατρηθεί αλλά θα δεν θα εξορυχθεί με κόκκινο χρώμα.

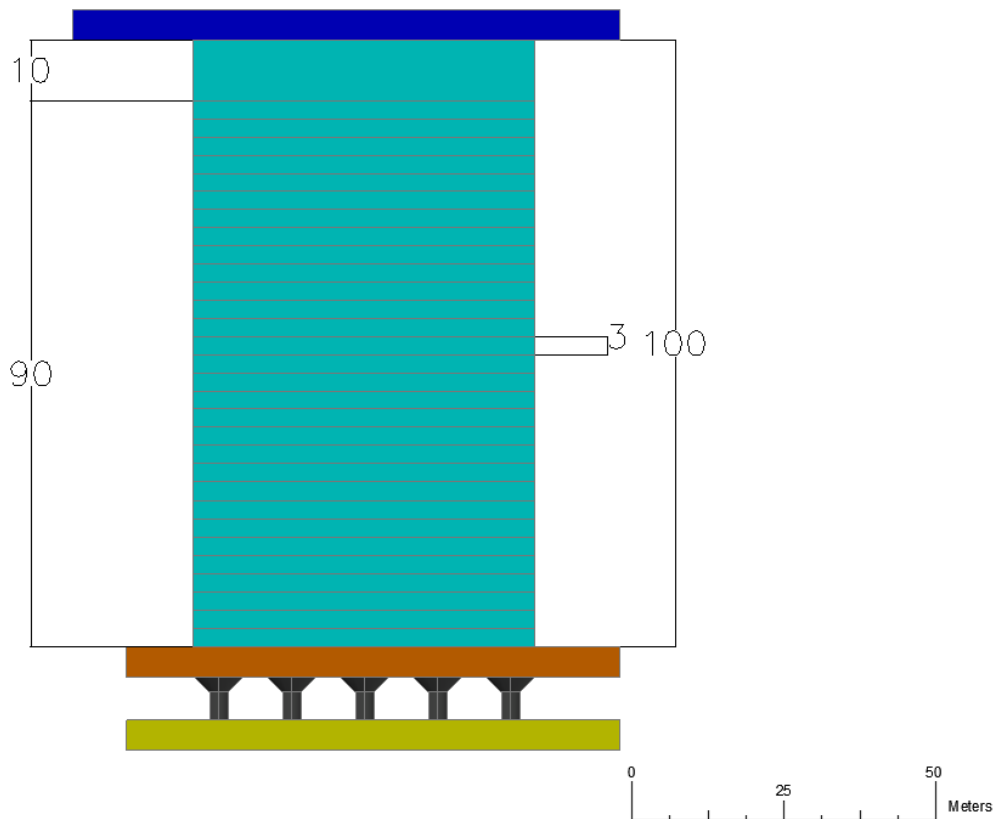


Σχήμα 3.40: Παράδειγμα μετώπου με ακανόνιστη γεωμετρία του κοιτάσματος (τομή κατά την κλίση του κοιτάσματος).

Η παραπάνω ανάλυση αφορά αποκλειστικά και μόνο την εξόρυξη στα όρια του σώματος του κοιτάσματος με το περιβάλλον πέτρωμα.

- Περίπτωση 2^η : Μέτωπα με ύψος 100 μέτρα (Συνολικά 6 μέτωπα)

Ένα μέτωπο 100 μέτρων για να εξορυχθεί πλήρως, χρειάζονται θεωρητικά $N = \frac{100}{3} \Rightarrow N = 33.3 = 34$ βήματα ανατινάξεων. Αν όμως ληφθεί υπόψη ότι τα τελευταία περίπου 10 μέτρα θα εξορυχθούν με μια ανατίναξη, τότε ο τελικός αριθμός ανατινάξεων ισούται με 31 (30+1) (Σχήμα 3.41).



Σχήμα 3.41: Συνολικά τμήματα ανατινάξεων ενός μετώπου 100 μέτρων (τομή κατά την κλίση του κοιτάσματος).

- Περίπτωση 3^η : Μέτωπα με διαφορετικά ύψη και μέσο ύψος ίσο με 60 μέτρα.

Όπως θα έγινε αντιληπτό, το ύψος διαδραματίζει σημαντικό ρόλο για την μελέτη ενός σχεδίου ανατίναξης με την μέθοδο VCR. Το ύψος είναι μια μεταβλητή παράμετρος που μπορεί να διαφοροποιήσει μια μελέτη όσον αφορά την συνολική μάζα εκρηκτικών που θα χρησιμοποιηθεί και τα βήματα ανατίναξης που θα πραγματοποιηθούν. Με άλλα λόγια, για κάθε διαφορετικό ύψος μετώπου, απαιτείται και νέα μελέτη, μια επιλογή ενεργοβόρα και χρονικά ανέφικτη. Συνεπώς, έγινε μια προσπάθεια στον σχεδιασμό ώστε όλα

τα μέτωπα να έχουν το ίδιο ύψος ίσο με 83 μέτρα. Όπως προέκυψε, το αρχικό ύψος των 83 μέτρων που επιλέχθηκε δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα μέτωπα του κοιτάσματος για 2 κύριους λόγους.

Τα προπαρασκευαστικά έργα οφείλουν κατά το δύναμιν να προσαρμοστούν στη γεωμετρία του κοιτάσματος, η οποία έχει αυξομειώσεις του ύψους και ταυτόχρονα εξαρτώνται από τις διευθυντικές στοές. Τα έργα συνδέονται με τις διευθυντικές στοές μέσω εγκάρσιων στοών προσβολής οι οποίες έχουν ως άνω όριο κλίσης 13%. Η συμβιβαστική λύση που προκύπτει είναι ο σχεδιασμός με 2 κύρια ύψη μετώπων (εξαιρέση αποτελούν 6 μέτωπα που το ύψος τους αποκλίνει από αυτά). Σε αυτή την περίπτωση που αποτελεί εξαιρέση, θα υπολογιστεί το μέσο ύψος τους, με συνέπεια το αποδεκτό σφάλμα στα επόμενα στοιχεία που θα προκύψουν.

Τα μέτωπα που έχουν μοναδικό ύψος είναι 6 και η τιμή για το καθένα είναι 61.6 m, 68.1 m, 44.4 m 65 m, 71.1 m και 92.0 m.

Το μέσο ύψος (M.Y.) που προκύπτει είναι:

$$M.Y. = \frac{61.6 + 68.1 + 44.4 + 65 + 71.1 + 92.0}{6} \rightarrow M.Y. = 67.033 \approx 67 \text{ m} .$$

Με βάση το μέσο ύψος, τα μέτωπα αυτά για να εξορυχθούν πλήρως, χρειάζονται θεωρητικά $N = \frac{67}{3} = 3$ βήματα ανατινάξεων. Αν όμως ληφθεί υπόψη ότι τα τελευταία περίπου 10 μέτρα θα εξορυχθούν με μια ανατίναξη, τότε ο τελικός αριθμός ανατινάξεων ισούται με 20 (19+1).

Η εξόρυξη σε ένα μέτωπο όπου πρώτα έχουν ορυχθεί τα διατρήματα ακολουθεί την εξής διαδικασία:

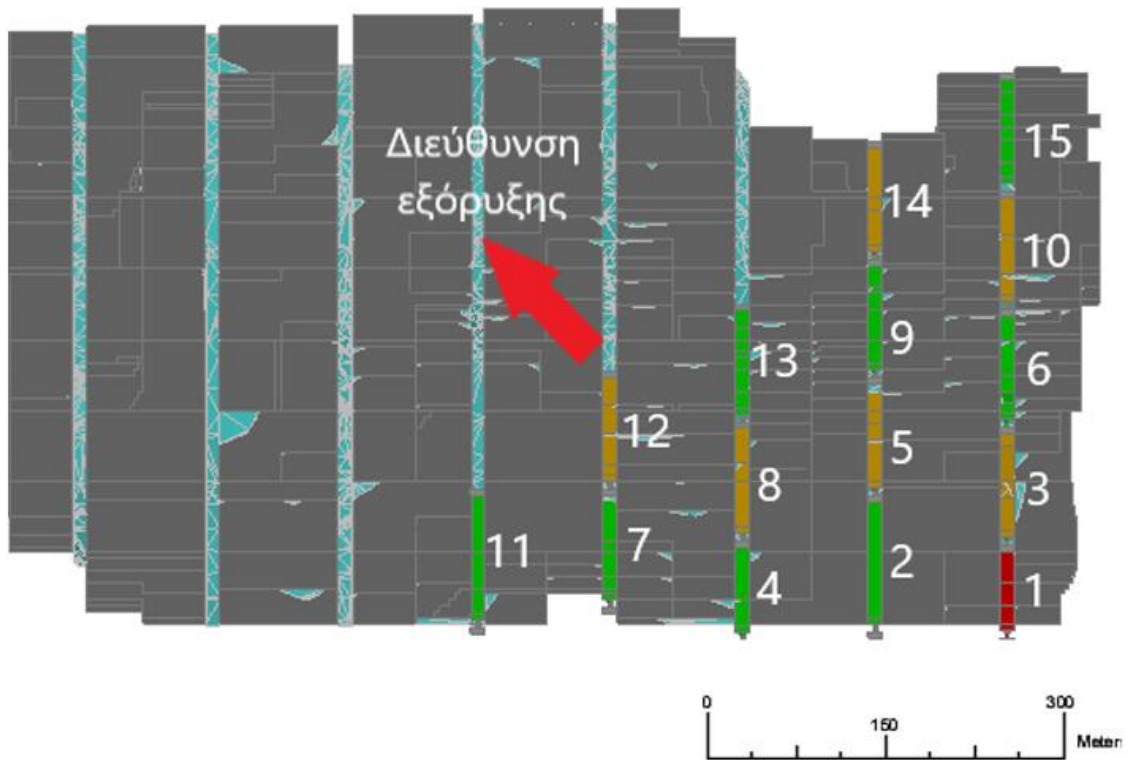
- Υπολογισμός βάθους τοποθέτησης της εκρηκτικής ύλης.
- Γόμωση των διατρημάτων.
- Ανατίναξη.
- Αναμονή για την απομάκρυνση των καυσαερίων και την απομάκρυνση σκόνης από την πρόσφατη απόθεση του θραυσμένου υλικού στην στοά αποκομιδής.
- Αποκομιδή και μεταφορά του υλικού

Με το πέρας της διαδικασίας αυτής, ολοκληρώνεται και η εξόρυξη ενός τμήματος ενός μετώπου. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται εκ νέου για την συνέχιση της εξόφλησης

του μετώπου. Το εξορυγμένο υλικό οδηγείται με αυτοφορτωτές από την στοά αποκομιδής μέχρι τα λούκια που βρίσκονται στις στοές προσβολής της μεθόδου Drift n' fill. Αξίζει να σημειωθεί ότι στις υπόγειες εκμεταλλεύσεις όπου χρησιμοποιούνται χοάνες για την συγκέντρωση και αποκομιδή υλικού, συνήθως υπάρχει και ένα επίπεδο σχάρας. Πιο συγκεκριμένα, για την αποφυγή απόφραξης μιας χοάνης, τοποθετείται μια σχάρα η οποία οδηγεί τα μεγαλύτερα ογκοτεμάχια σε μια δευτερεύουσα στοά, όπου εφαρμόζεται δευτερογενής θραύση. Η στοά αυτή καθώς είναι αδύνατο να βρίσκεται στην ίδια κάθετη διεύθυνση, τοποθετείται σε χαμηλότερο επίπεδο σε πλαϊνή θέση. Δεδομένου ότι η μέθοδος VCR εφαρμόζεται σε έναν στύλο προστασίας ο οποίος περιβάλλεται από την λιθογόμωση των μετώπων μεθόδου Drift n fill, η όρυξη μιας δευτερεύουσας στοάς είναι μια επικίνδυνη επιχείρηση.

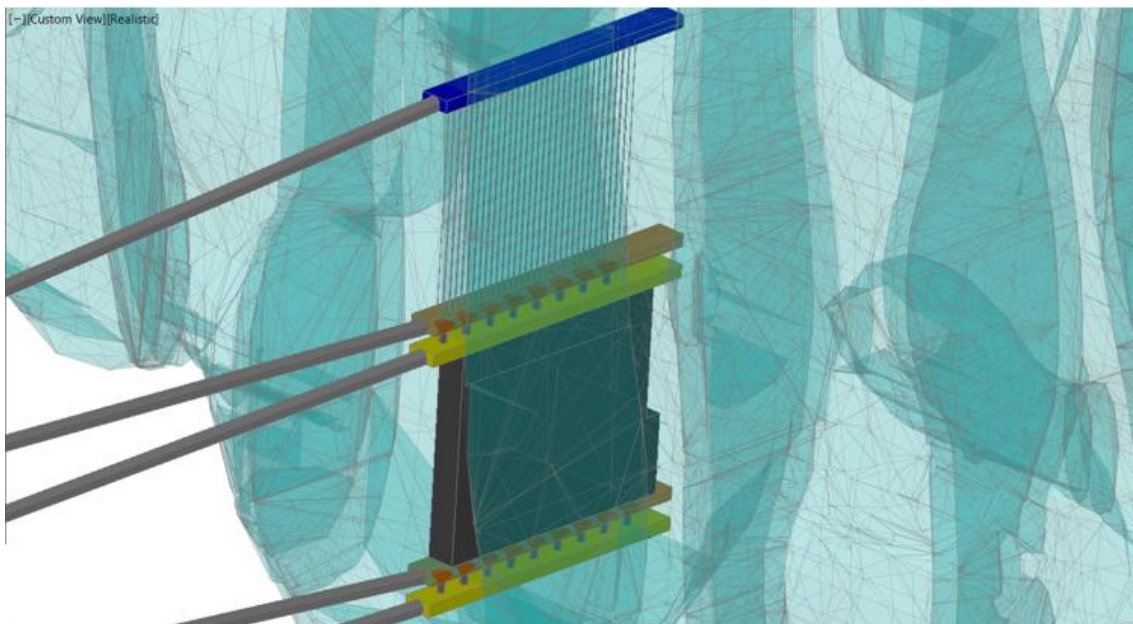
Συνεπώς, ενώ δεν υπάρχει επίπεδο σχάρας, η εμφάνιση ογκοτεμαχίων με διάσταση μεγαλύτερη ή ίση των 3 μέτρων έχει πολύ μικρή πιθανότητα αν το σχέδιο διάτρησης ανατίναξης έχει γίνει προσεκτικά. Σημειώνεται πως το σχέδιο ανατίναξης της μεθόδου VCR, παράγει εξαιρετικά θραυσμένο πέτρωμα, ενώ ταυτόχρονα, όσο η εξόρυξη ενός μετώπου εξελίσσεται προς την ανώτερη στοά, το ύψος από όπου «πέφτει» το θραυσμένο πέτρωμα μεγαλώνει. Συνεπώς, ακόμα και στο ενδεχόμενο πτώσης ενός ογκοτεμαχίου με ικανές διαστάσεις, αυτό θα συνθλιφτεί κατά την πρόσκρουση στα τοιχώματα μεταξύ των χοανών. Τέλος οι διαστάσεις των χοανών επικουρούν στο να αποφευχθεί η πιθανότητα απόφραξης. Τα τοιχώματα των 4 μέτρων κρίνονται ικανά να υποστηρίξουν την πτώση των θραυσμένων πετρωμάτων και η διάμετρος 3 μέτρων των απολήξεων των χοανών βοηθάει στην απομάκρυνση όλων των υλικών με διαστάσεις της τάξης 1-3 μέτρων.

Μόλις ολοκληρωθεί η εξόρυξη ενός μετώπου ακολουθεί η λιθογόμωση του με τσιμεντοπολφό με τον ίδιο τρόπο όπως και στην μέθοδο Drift n' fill. Ύστερα, η εκμετάλλευση συνεχίζεται σε επόμενο μέτωπο το οποίο όμως βρίσκεται σε μια ικανή απόσταση από το προηγούμενο και δεν θα είναι το αμέσως ανώτερο. Η εκμετάλλευση όπως και στην προηγούμενη μέθοδο εφαρμόζεται από την κατώτερη άκρη του κοιτάσματος με κατεύθυνση ανοδική και οριζόντια ταυτόχρονα (Σχήμα 3.42).



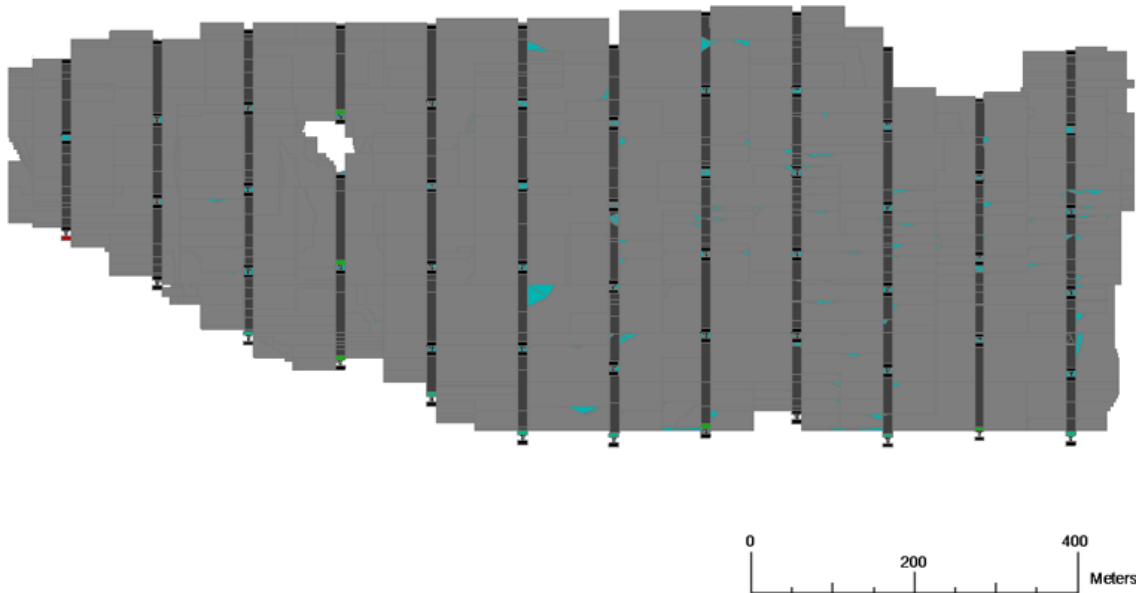
Σχήμα 3.42: Σειρά εξόρυξης μετώπων της μεθόδου VCR (τομή κατά την παράταξη του κοιτάσματος).

Η στερεοποίηση της λιθογόμωσης σε ένα μέτωπο απαιτεί χρόνο και μόλις ολοκληρωθεί τότε είναι εφικτή η εκμετάλλευση του αμέσως ανώτερου μετώπου. Στην προαναφερθείσα περίπτωση, η λιθογόμωση αποτελεί δάπεδο εργασίας και η ανώτερη στοά που αποτελούσε το επίπεδο διατηρημάτων στο κατώτερο μέτωπο, θα είναι η στοά αποκομιδής για το αμέσως ανώτερο (Σχήμα 3.43).



Σχήμα 3.43: Τρισδιάστατη απεικόνιση εξέλιξης της μεθόδου VCR κατά την κατακόρυφο έννοια.

Η ολοκλήρωση της εκμετάλλευσης με την μέθοδο VCR δημιουργεί μια εικόνα ενός πλήρως εξοφλημένου και λιθογομωμένου κοιτάσματος (Σχήμα 3.44). Επίσης, στο Παράρτημα Α: Τελικές τομές παρατίθενται τα σχέδια της συνδυαστικής μεθόδου σε τελική μορφή.

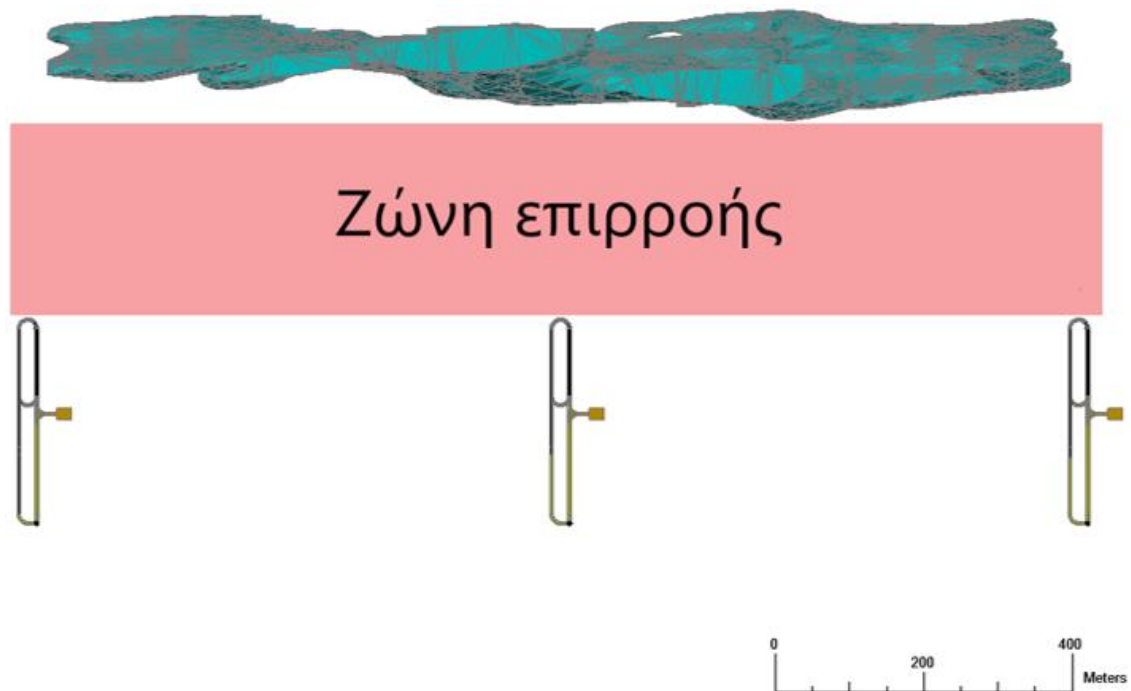


Σχήμα 3.44: Εικόνα πλήρως εξοφλημένου κοιτάσματος με συνδυασμό των 2 μεθόδων υπόγειας εκμετάλλευσης (τομή κατά την παράταξη του κοιτάσματος).

3.4 Σχεδιασμός της αυτόνομης μεθόδου VCR

3.4.1 Έργα προσπέλασης της αυτόνομης μεθόδου VCR

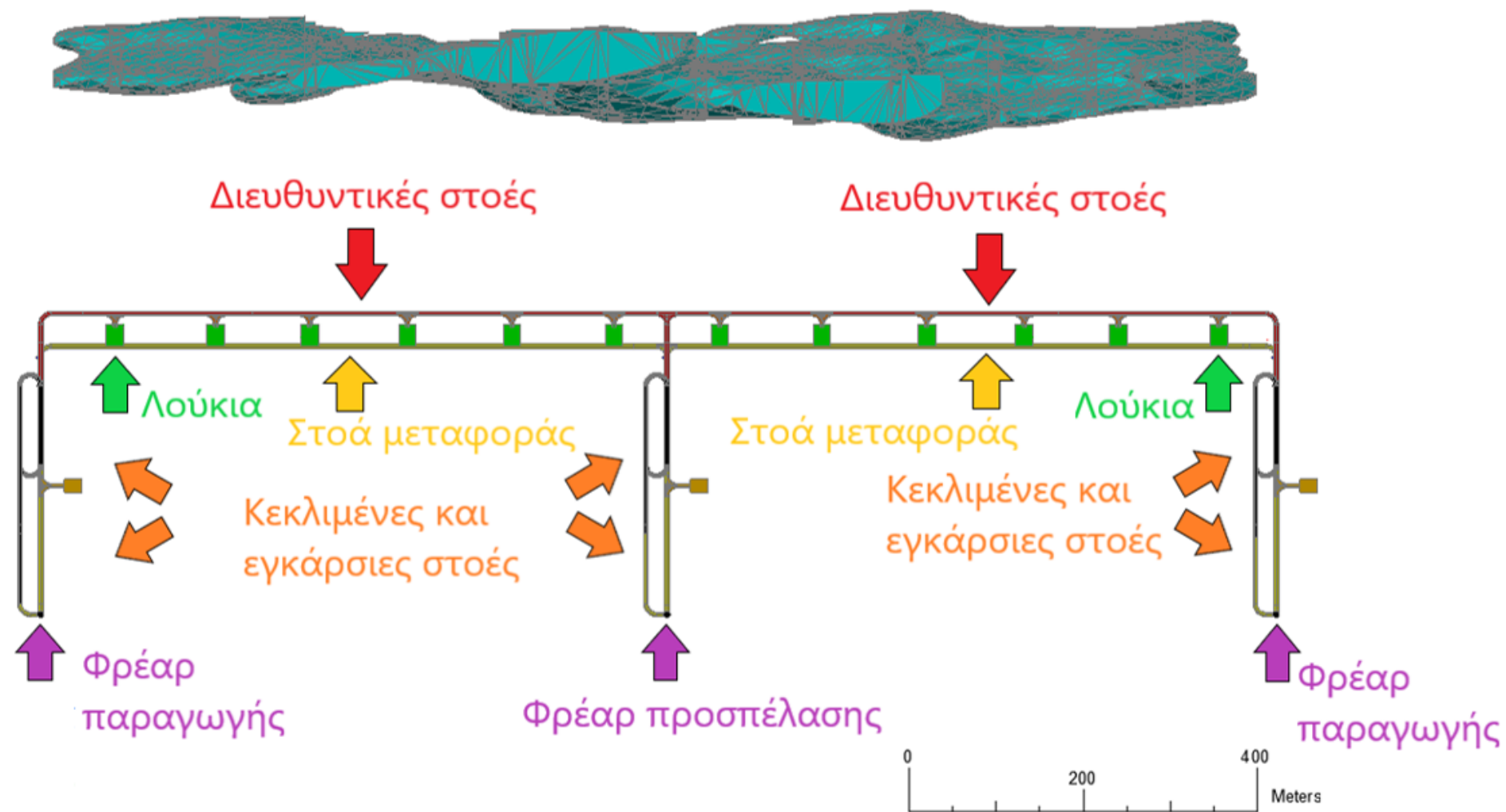
Τα έργα προσπέλασης στον παρόν σχεδιασμό είναι πανομοιότυπα με την συνδυαστική εκμετάλλευση των μεθόδων Drift n' fill και VCR. Αυτό γίνεται αφενός για λόγους σύγκρισης με την συνδυαστική εκμετάλλευση και αφετέρου ο σχεδιασμός των έργων προσπέλασης δεν θα είχε δραματικές τροποποιήσεις. Πιο συγκεκριμένα, η λογική της σχεδίασης θα παρέμενε η ίδια, αλλά θα τροποποιούνταν τα ύψη στις διευθυντικές στοές ώστε να εξυπηρετούν στο έπακρο τις στοές προσβολής των μετώπων (όσο το δυνατόν μικρότερη κλίση). Επιπλέον, λόγω των ανατινάξεων, θα ισχύει ακόμη η ζώνη επιρροής με αποτέλεσμα να μην αλλάξει ούτε η θέση των έργων (Σχήμα 3.45).



Σχήμα 3.45: Κάτοψη έργων προσπέλασης της αυτόνομης μεθόδου VCR.

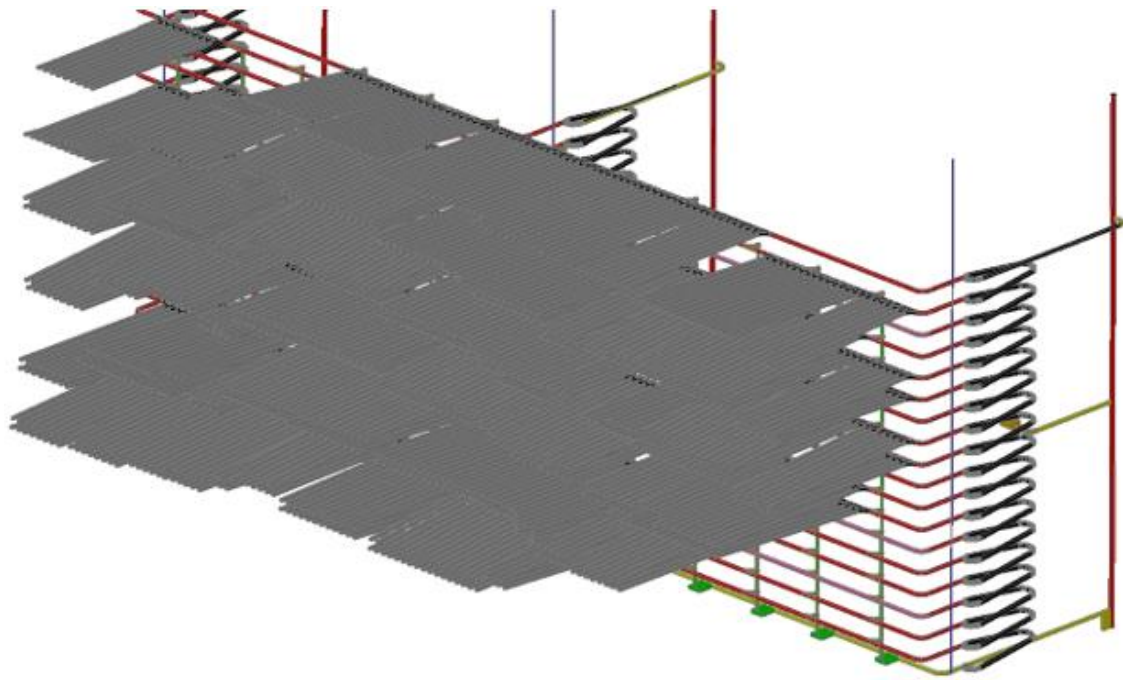
3.4.2 Έργα προπαρασκευής της αυτόνομης μεθόδου VCR

Η φιλοσοφία των έργων προπαρασκευής δεν άλλαξε δραματικά. Ακολουθήθηκε σε πολλές περιπτώσεις παρόμοια λογική σχεδίασης με την μέθοδο εκμετάλλευσης VCR που αναλύθηκε στην [υποενότητα 3.3.1](#). Υπάρχουν ωστόσο αναπόφευκτα ορισμένες διαφορές. Αρχικά, τα λούκια μετατοπίστηκαν και ενσωματώθηκαν στις διεθυντικές στοές. Συνεπώς, δεν παρεμβάλλονται στις στοές προσβολής των μετώπων. Ο λόγος για αυτό είναι ότι οι εγκάρσιες στοές προσβολής είναι σε ακανόνιστες θέσεις μεταξύ τους και δεν είναι εφικτή η σύνδεση όλων σε ένα ενιαίο λούκι. Οι διαστάσεις των χώρων απόθεσης όπως και τα σώματα των λουκιών είναι ίδιες, ενώ η απόσταση μεταξύ 2 διαδοχικών λουκιών είναι 120 μέτρα περίπου. Επίσης, στον παρόν σχεδιασμό, η κύρια στοά μεταφοράς βρίσκεται πιο κοντά στα έργα προσπέλασης (σε αντίθεση με τον προηγούμενο σχεδιασμό όπου βρισκόταν πιο κοντά στο κοίτασμα) αλλά όχι ακριβώς κάτω από τις διεθυντικές στοές ([Σχήμα 3.46](#)).



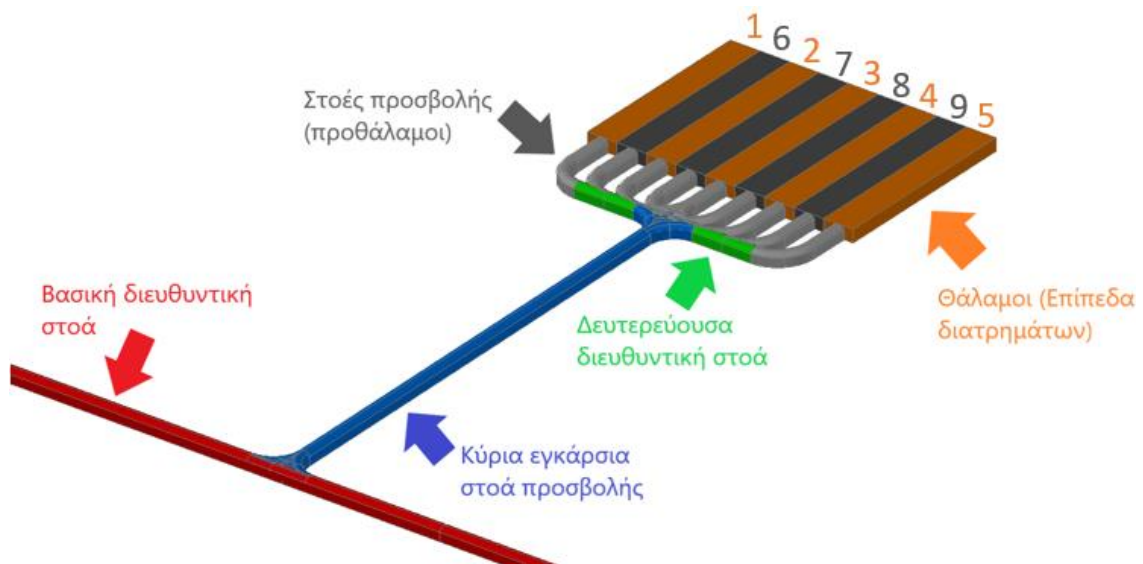
Σχήμα 3.46: Λούκια και κύρια στοά μεταφοράς μαζί με τα έργα προσπέλασης (κάτοψη)

Τα έργα προπαρασκευής σε αυτήν την μέθοδο θα μπορούσαν να είναι πανομοιότυπα με αυτά που έχουν περιγραφεί στην [υποενότητα 3.3.1](#). Πιο συγκεκριμένα, από τις διευθυντικές στοές θα ορύσσονταν στοές προσβολής για κάθε επίπεδο κάθε μετώπου και θα υπήρχε μια μεγάλη συμφόρηση από στοές η οποία αποτυπώνεται στο παρακάτω [Σχήμα 3.47](#).



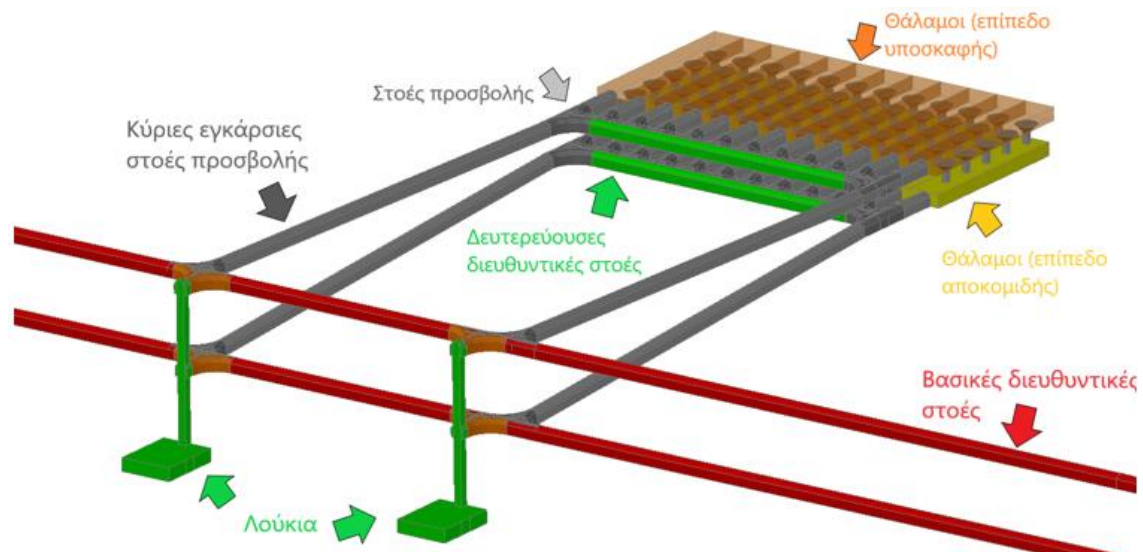
Σχήμα 3.47: Υπόθεση όρυξης συμβατικών στοών προσβολής της αυτόνομης μεθόδου VCR.

Σε αυτήν την περίπτωση κρίνεται εξαιρετικά ασύμφορη η όρυξη αυτού του αριθμού των στοών από άποψη κόστους, χρόνου και ιδιαιτέρως, ασφάλειας. Συνεπώς, προτείνεται μια διαφορετική προσέγγιση, με όρυξη κύριων εγκάρσιων στοών προσβολής οι οποίες θα καταλήγουν σε ένα νέο σύστημα δευτερευουσών διευθυντικών στοών. Κάθε δευτερεύουσα διευθυντική στοά θα απέχει περίπου 25 μέτρα από τα μέτωπα ώστε να υπάρχει χώρος για τα διατρητικά να ορύξουν τους θαλάμους των επιπέδων των μετώπων. Ο σχεδιασμός προβλέπει μια εγκάρσια στοά προσβολής (μια είσοδο – έξοδο) για μια δευτερεύουσα διευθυντική στοά η οποία παρέχει πρόσβαση σε 9 το πολύ μέτωπα ([Σχήμα 3.48](#)). Στο [Σχήμα 3.48](#) παρατηρείται ότι υπάρχουν 9 θάλαμοι για την όρυξη διατρημάτων σε 9 μέτωπα και παρατίθεται και η σειρά όρυξης και λιθογόμωσης τους (η οποία ταυτίζεται με την σειρά εξόρυξης των μετώπων). Οι στοές προσβολής δεν θα λιθογομωθούν καθώς υπάρχει επαρκής υποστήριξη και 7 μέτρα απόσταση μεταξύ τους. Επίσης, για τις δευτερεύουσες διευθυντικές και την κύρια εγκάρσια στοά προσβολής δεν τίθεται θέμα λιθογόμωσης.



Σχήμα 3.48: Τρισδιάστατη απεικόνιση πρόσβασης στα επίπεδα διατρημάτων της αυτόνομης μεθόδου VCR

Κάθε διευθυντική στοά που θα υπερβαίνει τον προαναφερθέν αριθμό πρόσβασης στοών θα διαθέτει και δεύτερη στοά προσβολής για λόγους ασφαλείας (δύο είσοδοι – έξοδοι) ενώ για διευθυντικές που υπερβαίνουν την πρόσβαση σε 18 μέτωπα θα υπάρχει και τρίτη στοά προσβολής (Σχήμα 3.49).

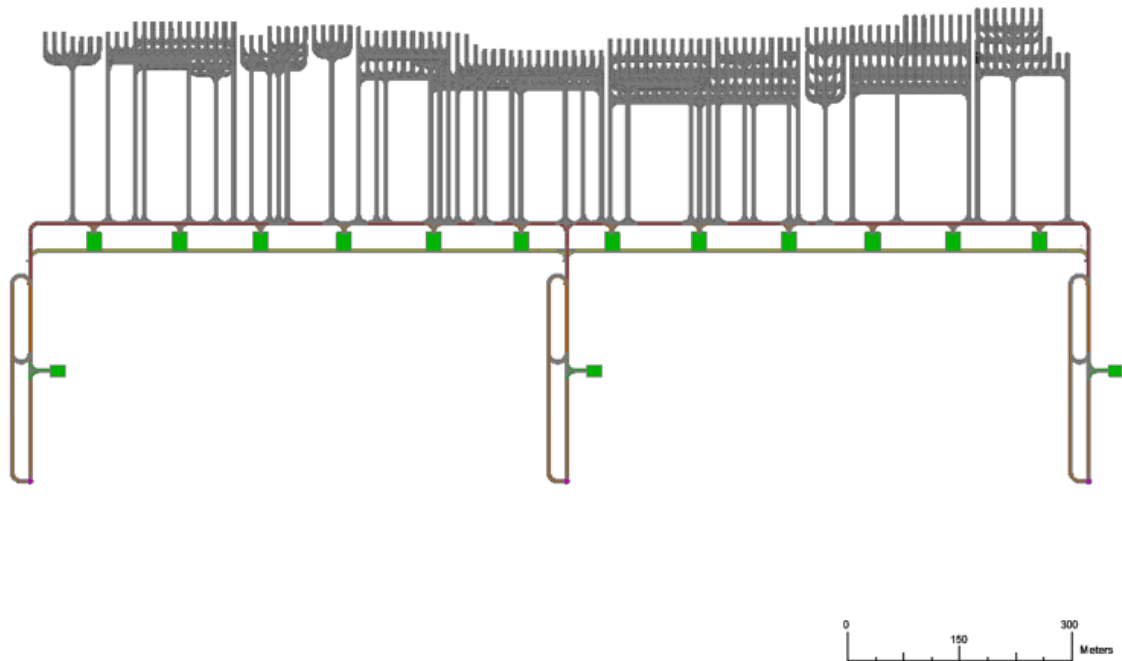


Σχήμα 3.49: Τρισδιάστατη απεικόνιση πρόσβασης σε μεγάλο αριθμό επιπέδων των μετώπων

Στο Σχήμα 3.49 παρουσιάζεται ο τρόπος πρόσβασης στα επίπεδα αποκομιδής και υποσκαφής 12 μετώπων. Όλοι οι θάλαμοι θα λιθογομωθούν με την ίδια αλληλουχία που παρουσιάστηκε στο Σχήμα 3.48. Με αυτό το τρόπο μειώνεται ο όγκος στείρων που θα εξορυχθεί κατά 70% συγκριτικά με την πρώτη προσέγγιση ενώ αυξάνεται σημαντικά η ασφάλεια. Με βάση τον παρακάτω λόγο όγκων στοών προσβολής προκύπτει:

$$\frac{\text{Συνολικός όγκος στοών προσβολής (πρώτη προσέγγιση)}(m^3)}{\text{Συνολικός όγκος στοών προσβολής (δεύτερη προσέγγιση)}(m^3)} = \frac{5,845,456}{1,828,873} = 3.20$$

Το σύνολο των έργων προσβολής φαίνεται στην παρακάτω κάτοψη (Σχήμα 3.50).



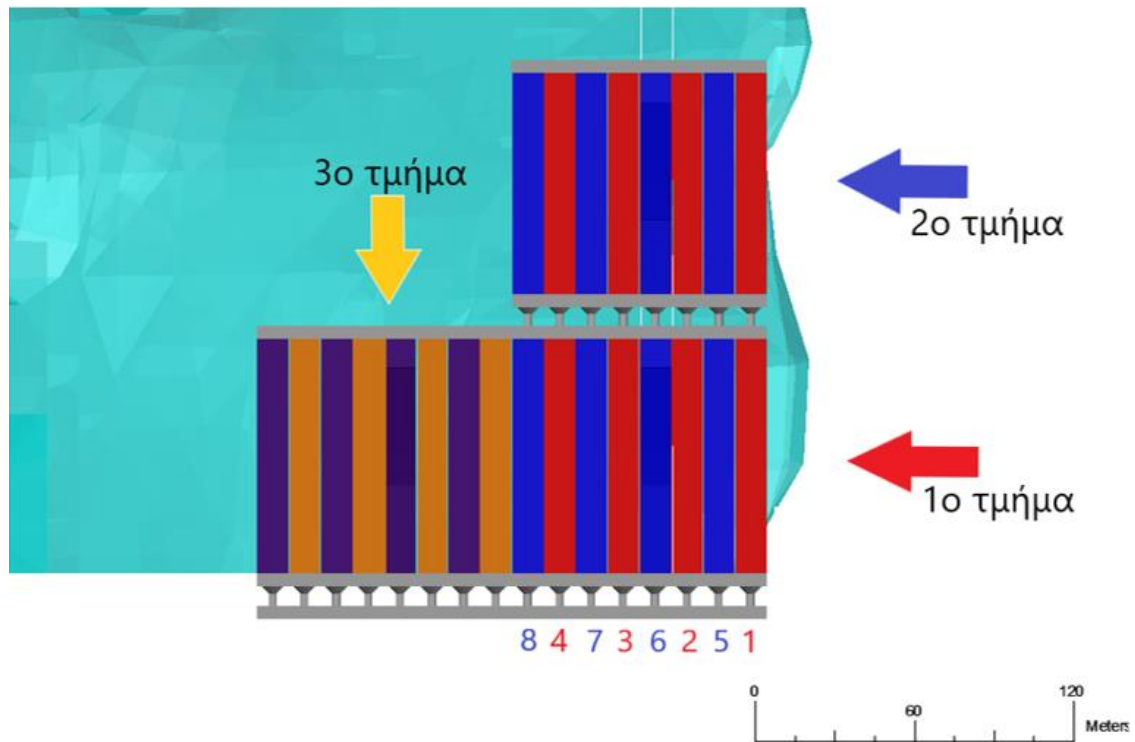
Σχήμα 3.50 Κάτοψη έργων προσβολής των επιπέδων της αυτόνομης μεθόδου VCR

3.4.3 Έργα ανάπτυξης και εφαρμογή της αυτόνομης μεθόδου VCR

Τα έργα ανάπτυξης της μεθόδου είναι επίσης παρόμοια με αυτά που περιεγράφηκαν στην [υποενότητα 3.3.2](#). Ουσιαστικά η αυτόνομη μέθοδος VCR είναι η εφαρμογή της μεθόδου VCR σε μεγαλύτερη κλίμακα. Τα μέτωπα χωρίζονται και εδώ σε 2 κύρια ύψη. Τα περισσότερα μέτωπα έχουν ύψος 83 μέτρα ενώ ένα υπολογίσιμο ποσοστό έχει ύψος 100 μέτρα. Η ανάλυση των βημάτων εξόρυξης είναι ακριβώς η ίδια όπως περιεγράφηκε στην [υποενότητα 3.3.2](#). Επιπλέον, όπως και στην αρχική μέθοδο VCR, υπάρχουν τα ίδια προβλήματα με τις απότομες μεταβολές του σχήματος του κοιτάσματος.

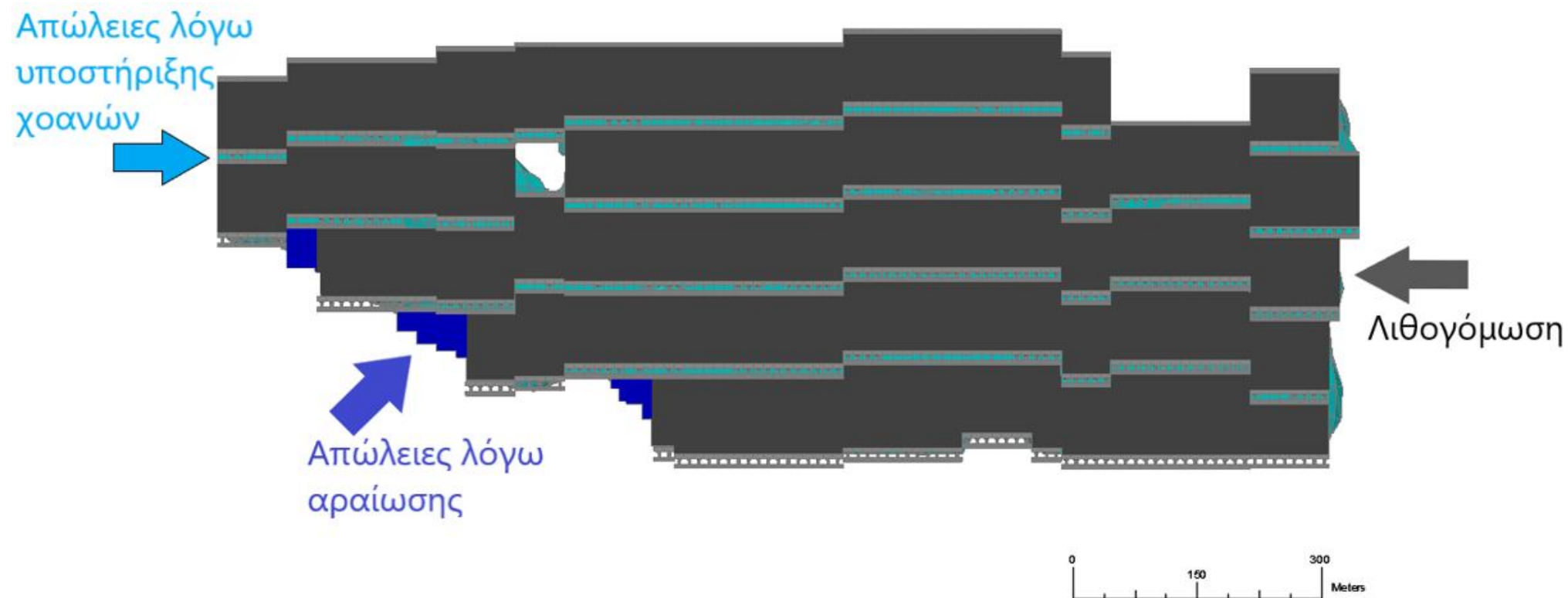
Η λογική της εξόρυξης παραμένει η ίδια. Το θραυσμένο υλικό μεταφέρεται από την στοά αποκομιδής με χρήση LHD μέχρι τις διευθυντικές στοές όπου αποτίθεται στο πλησιέστερο λούκι. Στον χώρο απόθεσης κάθε λουκιού βρίσκεται ένα μηχάνημα το οποίο φορτώνει ένα φορτηγό και αυτό με την σειρά του, οδηγεί το υλικό στους σπαστήρες των φρεάτων. Η εκμετάλλευση αρχίζει από την κατώτερη άκρη του κοιτάσματος με κατεύθυνση ανοδική και οριζόντια ταυτόχρονα. Τα μέτωπα χωρίζονται σε ομάδες (τμήματα)

και εξορύσσονται με ανοδική και οριζόντια κατεύθυνση. Η σειρά εξόρυξης των μετώπων περιγράφεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.51).



Σχήμα 3.51: Σειρά εξόρυξης των μετώπων της αυτόνομης μεθόδου VCR (τομή κατά την παράταξη του κοιτάσματος).

Η ολοκλήρωση της εκμετάλλευσης με την μέθοδο VCR δημιουργεί μια εικόνα ενός πλήρως εξοφλημένου και λιθογομωμένου κοιτάσματος (Σχήμα 3.52). Ωστόσο πρέπει να αναφερθεί ότι, λόγω της φύσης της μεθόδου, είναι ασύμφορο από άποψη κόστους να κατασκευαστούν προπαρασκευαστικά έργα για ένα μέτωπο ύψους 20 μέτρων και λιγότερο. Ταυτόχρονα, η εξόφληση ενός μετώπου με ανάμιξη στείρου πετρώματος με όγκο μεγαλύτερο του 30% - 40% του συνολικού όγκου που θα εξορυχθεί, θα αύξανε δραματικά την αραίωση του μεταλλεύματος. Συνεπώς, κρίθηκε ορθότερο να αφεθούν ορισμένα τμήματα του κοιτάσματος ανεκμετάλλευτα θεωρούμενα ως απώλειες (μπλε χρώμα). Επίσης, στο Παράρτημα Α: Τελικές τομές παρατίθενται τα σχέδια της αυτόνομης μεθόδου VCR σε τελική μορφή.



Σχήμα 3.52: Αποψη εξοφλημένου κοιτάσματος με την αυτόνομη μέθοδο VCR (τομή κατά την παράταξη του κοιτάσματος).

Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθούν τα δεδομένα που προκύπτουν από τα σχέδια. Τα δεδομένα που διατίθενται από τα σχέδια των εκμεταλλεύσεων αφορούν κυρίως όγκους των έργων που πραγματοποιήθηκαν. Από τους όγκους που διατίθενται, είναι εφικτό να υπολογιστούν κάποιοι δείκτες, με τους οποίους θα γίνει και σύγκριση μεταξύ της συνδυαστικής μεθόδου εκμετάλλευσης και της αυτόνομης μεθόδου VCR.

Πιο συγκεκριμένα, υπολογίστηκε η αραίωση με βάση τα τρισδιάστατα σχεδιαστικά προσομοιώματα, για κάθε μέθοδο καθώς και ο λόγος έργων προπαρασκευής με τα έργα εκμετάλλευσης και των συνολικών έργων (προσπέλασης και προπαρασκευής) προς τα έργα εκμετάλλευσης. Αρχικά, θα αναφερθούν ορισμένες παραδοχές που ελήφθησαν ώστε να γίνει εφικτός ο σχεδιασμός:

- Θεωρείται ότι υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή του μεταλλεύματος στο σώμα του κοιτάσματος
- Θεωρείται ότι δεν υπάρχει βαθμός αποκοπής (Cut off point). Η εξόρυξη έλαβε μέρος σε όλη την έκταση του κοιτάσματος με ελάχιστες εξαιρέσεις σε ορισμένα σημεία όπου ο σχεδιασμός ήταν ανέφικτος.
- Θεωρείται ότι η αντοχή του περιβάλλοντος πετρώματος είναι μέτρια προς υψηλή.
- Θεωρείται ότι η αντοχή του μεταλλεύματος (μητρικού πετρώματος) είναι μέτρια προς υψηλή.
- Θεωρείται ότι η όρυξη κατακόρυφων διατρημάτων μέχρι το βάθος των 100 μέτρων θα επιφέρει μέγιστο σφάλμα 1% καθώς είναι άγνωστη η πραγματική απόκλιση του διατρητικού μηχανήματος DTH.
- Θεωρείται ότι το τοπογραφικό ανάγλυφο της επιφάνειας είναι επίπεδο, επιτρέποντας την απρόσκοπτη ανάπτυξη εργοστασίων παραγωγής λιθογώμωσης, εργοστασίων επεξεργασίας μεταλλεύματος και των φρεάτων.

Ακολουθεί η παράθεση των όγκων που προέκυψαν από τα σχέδια στο λογισμικό Civil 3D για κάθε μέθοδο εκμετάλλευσης. Στον [Πίνακα 4.1](#) παρατίθενται οι όγκοι των έργων προσπέλασης.

Πίνακας 4.1: Όγκοι έργων προσπέλασης της μεθόδου Drift n' fill.

| ΕΡΓΑ | ΟΓΚΟΙ (m ³) |
|------------------------------|-------------------------|
| Φρέατα προσπέλασης/παραγωγής | 111,206 |

| | |
|--|----------------|
| Εγκάρσιες στοές διασύνδεσης κεκλιμένων ραμπών | 30,903 |
| Κεκλιμένες στοές (ράμπες) εναλλασσόμενης κατεύθυνσης | 345,379 |
| ΣΥΝΟΛΟ | 487,337 |

Στον Πίνακα 4.2 παρατίθενται οι όγκοι των έργων προπαρασκευής της μεθόδου Drift n' fill.

Πίνακας 4.2: Όγκοι έργων προπαρασκευής της μεθόδου Drift n' fill.

| ΕΡΓΑ | ΟΓΚΟΙ (m ³) |
|---|-------------------------|
| Φρέατα αερισμού | 15,162 |
| Κύρια στοά μεταφοράς | 66,643 |
| Συνεργεία | 11,613 |
| Διευθυντικές στοές (μαζί με τις στοές διασύνδεσης με τις κεκλιμένες ράμπες) | 618,076 |
| Λούκια | 146,994 |
| Στοές προσβολής | 2,548,280 |
| ΣΥΝΟΛΟ | 3,406,769 |

Ο όγκος των έργων ανάπτυξης της μεθόδου Drift n' fill ανέρχεται σε 33 εκ. m³. Όσον αφορά την λιθογόμωση που χρησιμοποιήθηκε στην μέθοδο Drift n' fill, υπολογίζονται όλα τα έργα ανάπτυξης καθώς και οι κεκλιμένες στοές πρόσβασης στα πατώματα των ορόφων. Ο συνολικός όγκος της λιθογόμωσης που χρησιμοποιήθηκε στην μέθοδο Drift n' fill ανέρχεται σε 35 εκ. m³. Ο λόγος των έργων προπαρασκευής προς τα έργα ανάπτυξης της μεθόδου Drift n' fill είναι:

$$\frac{\text{Έργα προπαρασκευής (m}^3\text{)}}{\text{Έργα ανάπτυξης (m}^3\text{)}} = \frac{3,406,769}{33,321,123} = 0.10224 = 10.22 \%$$

Αν ληφθούν υπόψη και τα έργα προσπέλασης ως άθροισμα με τα έργα προπαρασκευής, τότε το ποσοστό διαμορφώνεται σε 11.69 %. Το παραπάνω ποσοστό κρίνεται ικανοποιητικό και συμπεραίνεται ότι η σχεδίαση ήταν σε μεγάλο βαθμό ορθή με όσα έργα είναι αναγκαία ώστε να πραγματοποιηθεί η εκμετάλλευση με την λιγότερη δυνατή διάθεση αρχικού κεφαλαίου (επένδυση).

Εν συνεχεία παρατίθενται οι πίνακες που αφορούν τους όγκους της μεθόδου VCR. Οι όγκοι των έργων προσπέλασης ταυτίζονται με αυτούς της Drift n' fill και αναφέρθηκαν στον Πίνακα 4.1. Επίσης, τα έργα προπαρασκευής ταυτίζονται με αυτά της Drift n' fill με εξαίρεση τους θαλάμους (επίπεδα) εντός του κοιτάσματος και των στοών προσβολής τους. Στον Πίνακα 4.3 παρατίθενται οι όγκοι των παραπάνω έργων και θα

προστεθεί ο όγκος των υπόλοιπων έργων ώστε να βρεθεί ο συνολικός όγκος των προπαρασκευαστικών έργων της εκμετάλλευσης.

Πίνακας 4.3: Όγκοι έργων προπαρασκευής της μεθόδου VCR.

| ΕΡΓΑ | ΟΓΚΟΙ (m ³) |
|-------------------|-------------------------|
| Στοές προσβολής | 804,060 |
| Θάλαμοι (Επίπεδα) | 709,802 |
| ΣΥΝΟΛΟ | 1,513,862 |

Ο συνολικός όγκος των έργων προπαρασκευής της συνδυαστικής μεθόδου εκμετάλλευσης ισούται με 4.9 εκ. m³. Ταυτόχρονα, οι απώλειες λόγω της υποστήριξης των χοανών στην μέθοδο VCR ανέρχονται σε 187 χιλ. m³. Επιπλέον, η λιθογόμωση που χρησιμοποιήθηκε στην μέθοδο VCR, εφαρμόζεται στα μέτωπα εργασίας και στους θαλάμους (επίπεδα) από τους οποίους εκτελούνται οι βασικές εργασίες των έργων ανάπτυξης της μεθόδου. Στον Πίνακα 4.4 παρατίθενται οι όγκοι της λιθογόμωσης της μεθόδου VCR.

Πίνακας 4.4: Όγκοι λιθογόμωσης στην μέθοδο VCR.

| ΕΡΓΑ | ΟΓΚΟΙ (m ³) |
|-------------------|-------------------------|
| Θάλαμοι (επίπεδα) | 709,802 |
| Μέτωπα | 3,374,233 |
| ΣΥΝΟΛΟ | 4,084,035 |

Το σύνολο όγκου των έργων ανάπτυξης της συνδυαστικής μεθόδου εκμετάλλευσης ανέρχεται σε 36 εκ. m³. Συνεπώς, ο λόγος των έργων προπαρασκευής προς τα έργα ανάπτυξης της συνδυαστικής μεθόδου εκμετάλλευσης Drift n' fill και VCR είναι:

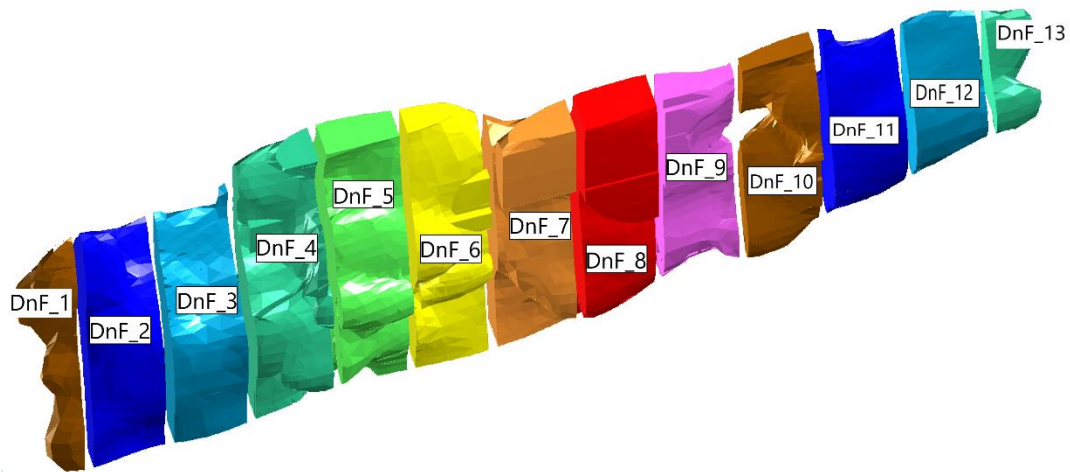
$$\frac{\text{Έργα προπαρασκευής (m}^3\text{)}}{\text{Έργα ανάπτυξης (m}^3\text{)}} = \frac{4,920,631}{36,695,356} = 13.41 \%$$

Αν ληφθούν υπόψη και τα έργα προσπέλασης ως άθροισμα με τα έργα προπαρασκευής, τότε το ποσοστό διαμορφώνεται σε 14.74 %. Το παραπάνω ποσοστό κρίνεται ικανοποιητικό και συμπεραίνεται ότι η σχεδίαση ήταν σε μεγάλο βαθμό ορθή με όσα έργα είναι αναγκαία ώστε να πραγματοποιηθεί η εκμετάλλευση με την λιγότερη δυνατή διάθεση αρχικού κεφαλαίου (επένδυση).

Εφόσον παρουσιάστηκαν όλα τα απαραίτητα στοιχεία που αφορούν την συνδυαστική μέθοδο εκμετάλλευσης, θα υπολογιστεί η σχεδιαστική αραίωση. Ως αραίωση ορίζεται το ποσοστό των αγόνων ή στείρων υλικών που αναμιγνύεται με το μέταλλευμα κατά την εκμετάλλευση (Εξαδάκτυλος, 2005). Η μέθοδος Drift n' fill η οποία είναι παραλλαγή της μεθόδου Cut n' fill, έχει το πλεονέκτημα ότι είναι επιλεκτική μέθοδος. Η αραίωση δηλαδή στην μέθοδο Cut n' fill είναι ένα φαινόμενο που δεν υφίσταται. Όμως,

λόγω της πραγματοποίησης του σχεδιασμού σε ένα λογισμικό και των γεωμετρικών ανωμαλιών του κοιτάσματος, θα ήταν αρκετά δύσκολο να παραδοθεί ένα σχέδιο όπου τα έργα εκμετάλλευσης δεν έχουν αποκλίνει από τα όρια του κοιτάσματος. Καταβλήθηκε ωστόσο μια σημαντική προσπάθεια να περιοριστεί η αραίωση, με την σχεδίαση ξεχωριστά κάθε μετώπου που βρίσκεται στα όρια του κοιτάσματος.

Τα μέτωπα και των δύο μεθόδων θα χωριστούν σε τομείς ώστε όχι μόνο να υπολογιστεί γενικώς η αραίωση αλλά και σε ποια σημεία της εκμετάλλευσης υπήρξαν τα μεγαλύτερα και αντίστοιχα τα μικρότερα ποσοστά. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται οι τομείς στους οποίους θα χωριστεί το σύνολο των λιθογομωμένων μετώπων της μεθόδου Drift n' fill (Σχήμα 4.1).



Σχήμα 4.1: Τομείς του κοιτάσματος της μεθόδου Drift n' fill για τον υπολογισμό της σχεδιαστικής αραίωσης (GEOVIA, 2022).

Στον παρακάτω Πίνακας 4.5 παρατίθενται οι όγκοι του κοιτάσματος ανά τομέα μαζί με τους όγκους που εξορύχθηκαν αντίστοιχα ώστε να υπολογιστεί η αραίωση ανά τομέα της μεθόδου Drift n' fill. Ο συνολικός όγκος του κοιτάσματος ισούται με 29 εκ. m^3 ενώ ο συνολικός όγκος των «τομέων» στους οποίους απευθύνεται η μέθοδος ισούται με 26 εκ. m^3 .

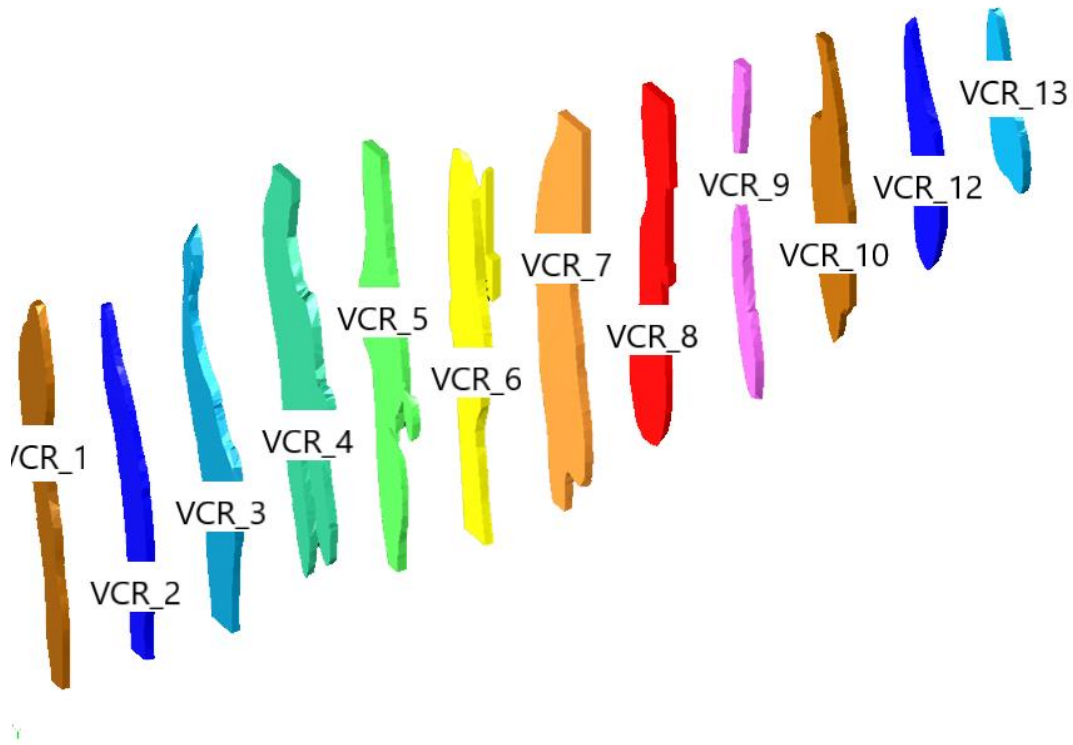
Πίνακας 4.5: Στοιχεία σχεδιαστικής αραίωσης της μεθόδου Drift n' fill.

| A/A | Όγκοι κοιτάσματος ανά τομέα (m^3) | Όγκοι που εξορύχθηκαν ανά τομέα (m^3) | Ποσοστό αραίωσης ανά τομέα (%) |
|-------|---------------------------------------|---|--------------------------------|
| DnF_1 | 727,417 | 1,172,140 | 61.14 |
| DnF_2 | 1,787,984 | 2,246,577 | 25.65 |
| DnF_3 | 1,848,609 | 2,341,589 | 26.68 |
| DnF_4 | 2,692,548 | 3,852,350 | 43.07 |

| | | | |
|-----------------|-------------------|-------------------|---------------|
| DnF_5 | 3,108,187 | 3,928,755 | 26.40 |
| DnF_6 | 2,645,176 | 3,620,414 | 36.87 |
| DnF_7 | 3,392,116 | 3,987,060 | 17.54 |
| DnF_8 | 3,429,379 | 4,074,335 | 18.81 |
| DnF_9 | 1,404,154 | 2,054,540 | 46.32 |
| DnF_10 | 1,260,093 | 1,711,369 | 35.81 |
| DnF_11 | 1,893,371 | 2,269,906 | 19.89 |
| DnF_12 | 1,232,569 | 1,550,872 | 25.82 |
| DnF_13 | 332,359 | 491,216 | 47.80 |
| ΣΥΝΟΛΙΚΑ | 25,753,962 | 33,301,123 | 29.30% |

Η αραίωση στο σύνολο του κοιτάσματος όπου εφαρμόστηκε η μέθοδος Drift n' Fill ανέρχεται σε 29.30%. Επίσης παρατηρείται μια διακύμανση των τιμών της αραίωσης με το μικρότερο ποσοστό να ισούται με 17.54% στον έβδομο τομέα (DnF_7) και το μεγαλύτερο στον πρώτο τομέα (DnF_1) ίσο με 61.14%. Ο λόγος που υπάρχουν μεγάλες διακυμάνσεις είναι η γεωμετρία του κοιτάσματος. Παρατηρώντας το [Σχήμα 4.1](#) και τις τιμές αραίωσης των υπόλοιπων τομέων, ισχύει ότι σε τομείς όπου οι τιμές αραίωσης είναι χαμηλές, η γεωμετρία του κοιτάσματος είναι γενικώς ομαλή χωρίς απότομες αλλαγές σε οποιαδήποτε διάσταση. Η ομαλή γεωμετρία του κοιτάσματος επιτρέπει την καλύτερη σχεδίαση και τον περιορισμό της αραίωσης στα όρια του κοιτάσματος. Από την άλλη, οι τομείς που παρουσιάζουν μεγάλα ποσοστά αραίωσης, διαθέτουν απότομες διαφοροποιήσεις στην γεωμετρία του κοιτάσματος δυσχεραίνοντας την ακριβή σχεδίαση και αυξάνοντας την εξόρυξη στείρου πετρώματος.

Όσον αφορά την μέθοδο VCR ακολουθείται η ίδια λογική ανάλυσης. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η αραίωση σε αυτή την μέθοδο δεν οφείλεται μόνο στην σχεδιαστική απόκλιση των «σωμάτων» των μετώπων από τα όρια του κοιτάσματος αλλά και στην ανεπιθύμητη, μα αναγκαία όμως, απόληψη στείρου περιβάλλοντος πετρώματος. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται οι τομείς στους οποίους θα χωριστεί το σύνολο των λιθογομωμένων μετώπων της μεθόδου VCR ([Σχήμα 4.2](#)). Ο όγκος κοιτάσματος στον οποίο απευθύνεται η μέθοδος VCR είναι αυτός που απέμεινε μετά την εφαρμογή της μεθόδου Drift n' Fill και ισούται με 3 εκ. m^3 .



Σχήμα 4.2: Τομείς του κοιτάσματος της μεθόδου VCR για τον υπολογισμό της σχεδιαστικής αραιώσης (GEOVIA, 2022).

Στον Πίνακα 4.6 παρατίθενται οι όγκοι του κοιτάσματος ανά τομέα μαζί με τους όγκους που εξορύχθηκαν αντίστοιχα ώστε να υπολογιστεί η αραιώση ανά τομέα της μεθόδου VCR.

Πίνακας 4.6: Στοιχεία σχεδιαστικής αραιώσης της μεθόδου VCR.

| A/A | Όγκοι κοιτάσματος ανά τομέα (m ³) | Όγκοι που εξορύχθηκαν ανά τομέα (m ³) | Ποσοστό αραιώσης ανά τομέα (%) |
|-----------------|---|---|--------------------------------------|
| VCR_1 | 229,204 | 272,946 | 19.08 |
| VCR_2 | 195,309 | 255,337 | 30.73 |
| VCR_3 | 269,602 | 322,229 | 19.52 |
| VCR_4 | 394,953 | 495,015 | 25.33 |
| VCR_5 | 332,618 | 418,300 | 25.76 |
| VCR_6 | 316,262 | 400,070 | 26.50 |
| VCR_7 | 455,652 | 498,407 | 9.38 |
| VCR_8 | 304,917 | 338,467 | 11.00 |
| VCR_9 | 97,527 | 132,547 | 35.91 |
| VCR_10 | 236,718 | 276,266 | 16.71 |
| VCR_11 | 156,196 | 182,613 | 16.91 |
| VCR_12 | 109,209 | 136,849 | 25.31 |
| ΣΥΝΟΛΙΚΑ | 3,098,167 | 3,729,046 | 20.36 |

Η αραίωση στο σύνολο του κοιτάσματος όπου εφαρμόστηκε η μέθοδος VCR ανέρχεται σε 20.36%. Επίσης παρατηρείται μια ελαφριά διακύμανση των τιμών της αραίωσης με το μικρότερο ποσοστό να ισούται με 9.38% στον έβδομο τομέα (VCR_7) και το μεγαλύτερο στον ένατο τομέα (VCR_9) ίσο με 35.91%. Ο λόγος που υπάρχουν οι διακυμάνσεις είναι η γεωμετρία του κοιτάσματος. Παρατηρώντας το [Σχήμα 4.2](#) και τις τιμές αραίωσης των υπόλοιπων τομέων, ισχύει ότι σε τομείς όπου οι τιμές αραίωσης είναι χαμηλές, η γεωμετρία του κοιτάσματος είναι γενικώς ομαλή χωρίς απότομες αλλαγές ιδίως στην κατακόρυφη διάσταση. Η ομαλή γεωμετρία του κοιτάσματος επιτρέπει την καλύτερη σχεδίαση και τον περιορισμό της αραίωσης. Από την άλλη, οι τομείς που παρουσιάζουν μεγάλα ποσοστά αραίωσης, διαθέτουν απότομες διαφοροποιήσεις στην γεωμετρία του κοιτάσματος με συνέπεια την αναγκαστική απόληψη στείρου πετρώματος κυρίως στις πρώτες ανατινάξεις.

Η αραίωση που παρουσιάζει συνολικά η συνδυαστική μέθοδος εκμετάλλευσης είναι :

$$\frac{\text{Σύνολο όγκων που εξορύχθηκε(VCR+DnF)(m^3)}}{\text{Συνολικός όγκος κοιτάσματος (m^3)}} = \frac{37,030,169}{28,852,129} = 1.2834 .$$

Η αραίωση δηλαδή έχει ποσοστό ίσο με 28.34%. Η ανάλυση συνεχίζεται ακριβώς όπως στην συνδυαστική μέθοδο και για την αυτόνομη μέθοδο VCR. Αρχικά, παρατίθενται στον [Πίνακα 4.7](#) οι όγκοι των έργων προσπέλασης της μεθόδου και στον [Πίνακα 4.8](#) οι όγκοι των έργων προπαρασκευής.

Πίνακας 4.7: Όγκοι έργων προσπέλασης της αυτόνομης μεθόδου VCR.

| ΕΡΓΑ | ΟΓΚΟΙ (m ³) |
|--|-------------------------|
| Φρέατα προσπέλασης/παραγωγής | 111,206 |
| Εγκάρσιες στοές διασύνδεσης κεκλιμένων ραμπών | 30,886 |
| Κεκλιμένες στοές (ράμπες) εναλλασσόμενης κατεύθυνσης | 365,509 |
| ΣΥΝΟΛΟ | 507,601 |

Πίνακας 4.8: Όγκοι των έργων προπαρασκευής της αυτόνομης μεθόδου VCR.

| ΕΡΓΑ | ΟΓΚΟΙ (m ³) |
|---|-------------------------|
| Φρέατα αερισμού | 15,132 |
| Κύρια στοά μεταφοράς | 58,158 |
| Συνεργεία | 11,613 |
| Διευθυντικές στοές (μαζί με τις στοές διασύνδεσης με τις κεκλιμένες ράμπες) | 626,915 |
| Λούκια | 173,200 |
| Στοές προσβολής | 1,828,873 |
| Θάλαμοι (επίπεδα) | 5,792,334 |
| ΣΥΝΟΛΟ | 8,506,225 |

Ο συνολικός όγκος των έργων προπαρασκευής της συνδυαστικής μεθόδου εκμετάλλευσης ισούται με 8.5 εκ. m³. Οι απώλειες λόγω της υποστήριξης των χοανών στην μέθοδο VCR ανέρχονται σε 1.8 εκ. m³ ενώ αν συνυπολογιστούν και οι απώλειες από τα σημεία του κοιτάσματος όπου δεν εφαρμόστηκε η μέθοδος, η τιμή που προκύπτει ισούται με 2 εκ. m³. Επιπλέον, ο όγκος της λιθογόμωσης που χρησιμοποιήθηκε στην αυτόνομη μέθοδο VCR παρατίθεται στον παρακάτω Πίνακα 4.9.

Πίνακας 4.9: Όγκοι λιθογόμωσης της αυτόνομης μεθόδου VCR.

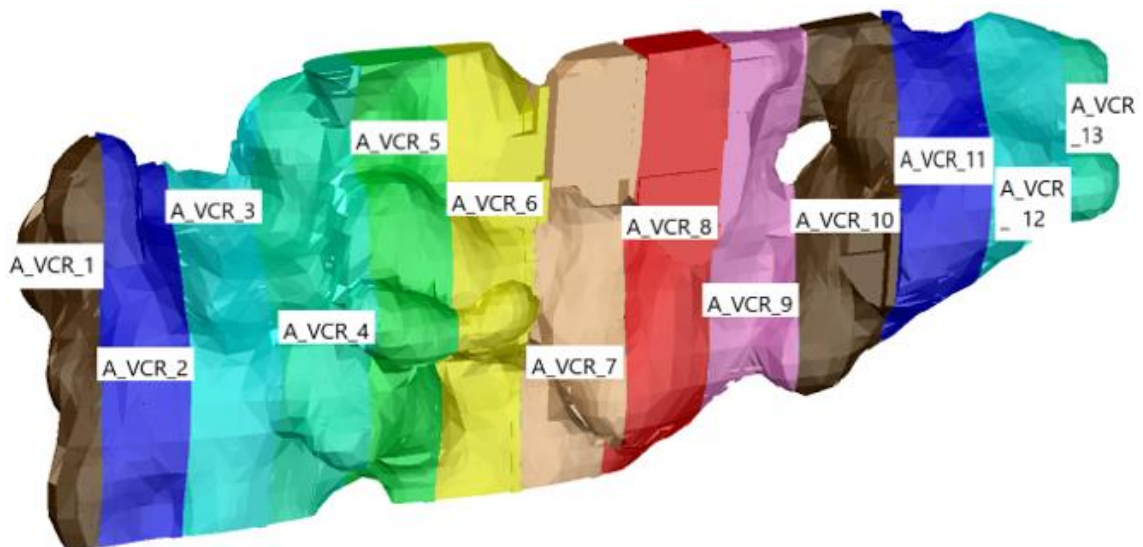
| ΕΡΓΑ | ΟΓΚΟΙ (m ³) |
|-------------------|-------------------------|
| Θάλαμοι (επίπεδα) | 5,792,334 |
| Μέτωπα | 28,646,667 |
| ΣΥΝΟΛΟ | 36,354,998 |

Ο λόγος των έργων προπαρασκευής προς τα έργα ανάπτυξης (όγκος των εξορυγμένων μετώπων) της αυτόνομης μεθόδου VCR είναι:

$$\frac{\text{Έργα προπαρασκευής (m}^3\text{)}}{\text{Έργα ανάπτυξης (m}^3\text{)}} = \frac{8,506,225}{30,562,664} = 27.83\%$$

Αν ληφθούν υπόψη και τα έργα προσπέλασης ως άθροισμα με τα έργα προπαρασκευής, τότε το ποσοστό διαμορφώνεται σε 29.49 %. Το παραπάνω ποσοστό κρίνεται ικανοποιητικό και συμπεραίνεται ότι η σχεδίαση ήταν σε μεγάλο βαθμό ορθή με όσα έργα είναι αναγκαία δεδομένου των συνθηκών ώστε να πραγματοποιηθεί η εκμετάλλευση με την λιγότερη δυνατή διάθεση κεφαλαίου.

Εφόσον παρουσιάστηκαν όλα τα στοιχεία περί όγκων της εκμετάλλευσης με την αυτόνομη μέθοδο VCR, θα υπολογιστεί η σχεδιαστική αραίωση. Όπως και στην παραπάνω ανάλυση, θα χωριστούν τα μέτωπα σε τομείς. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται οι τομείς στους οποίους θα χωριστεί το σύνολο των λιθογομωμένων μετώπων της αυτόνομης μεθόδου VCR (Σχήμα 4.3).



Σχήμα 4.3: Τομείς του κοιτάσματος της αυτόνομης μεθόδου VCR για τον υπολογισμό της σχεδιαστικής αραιώσης.

Στον Πίνακα 4.10 παρουσιάζονται τα στοιχεία σχεδιαστικής αραιώσης της αυτόνομης μεθόδου VCR.

Πίνακας 4.10: Στοιχεία σχεδιαστικής αραιώσης της αυτόνομης μεθόδου VCR.

| A/A | Όγκοι κοιτάσματος ανά τομέα (m ³) | Όγκοι που εξορύχθηκαν ανά τομέα (m ³) | Ποσοστό αραιώσης ανά τομέα (%) |
|-----------------|---|---|--------------------------------|
| A_VCR_1 | 956,621 | 1,201,046 | 25.55 |
| A_VCR_2 | 1,983,293 | 2,323,406 | 17.15 |
| A_VCR_3 | 2,118,211 | 2,435,681 | 14.99 |
| A_VCR_4 | 3,087,501 | 4,001,068 | 29.59 |
| A_VCR_5 | 3,440,805 | 4,107,168 | 19.37 |
| A_VCR_6 | 2,961,438 | 3,773,973 | 27.44 |
| A_VCR_7 | 3,847,768 | 4,316,454 | 12.18 |
| A_VCR_8 | 3,734,296 | 4,119,317 | 10.31 |
| A_VCR_9 | 1,501,681 | 1,829,440 | 21.83 |
| A_VCR_10 | 1,496,811 | 1,781,238 | 19.00 |
| A_VCR_11 | 2,049,567 | 2,080,767 | 1.52 |
| A_VCR_12 | 1,341,778 | 1,465,186 | 9.20 |
| A_VCR_13 | 332,359 | 454,213 | 36.66 |
| ΣΥΝΟΛΙΚΑ | 28,852,129 | 33,888,957 | 17.46 |

Η αραιώση στο σύνολο του κοιτάσματος με την εφαρμογή της αυτόνομης μεθόδου VCR ανέρχεται σε 17.46%. Επίσης παρατηρείται μια διακύμανση των τιμών της αραιώσης με το μικρότερο ποσοστό να ισούται με 1.52% στον εντέκατο τομέα (A_VCR_11) και το μεγαλύτερο στον δέκατο τρίτο τομέα (A_VCR_13) ίσο με 36.66%. Οι εξηγήσεις περί της διακύμανσης των τιμών αραιώσης ταυτίζονται και αναφέρονται στο ίδιο πεδίο της μεθόδου VCR παραπάνω.

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα και προτάσεις για έρευνα

Βάσει των αποτελεσμάτων που αναφέρθηκαν παραπάνω, σε συνδυασμό με τις παραδοχές θα εξαχθούν ορισμένα συμπεράσματα. Θα αποσαφηνιστεί κατά πόσο αποτελεσματική είναι η μέθοδος VCR και θα προταθούν θέματα για μελλοντική έρευνα.

5.1 Συμπεράσματα

Με βάση τις παραδοχές που ελήφθησαν, τα αποτελέσματα που προέκυψαν και τα σχέδια που εκπονήθηκαν προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα :

- Με την μέθοδο VCR θα ήταν εφικτό να υπάρξει μηδενική αραίωση με συνέπεια όμως την απώλεια μεγάλων όγκων μεταλλεύματος κυρίως στα όρια του κοιτάσματος.
- Η χρήση κατακόρυφων διατρημάτων πιθανώς να μην ήταν σε όλες τις περιπτώσεις χρήσιμη. Η όρυξη κεκλιμένων διατρημάτων ίσως να περιόριζε το ποσοστό αραίωσης, δυσκολεύοντας όμως την μελέτη ανατίναξης και πρακτικά την εξόρυξη λόγω σφαλμάτων στο πεδίο.
- Η προχώρηση κατά την ανατίναξη στην μέθοδο VCR θεωρήθηκε σχεδόν ίση με την ελάχιστη δυνατή. Για πιο αδύναμα μητρικά πετρώματα και πιο ισχυρά εκρηκτικά θα υπήρχε μεγαλύτερο ύψος προχώρησης με αποτέλεσμα την ταχύτερη εξόρυξη και λιγότερη κατανάλωση εκρηκτικής ύλης.
- Το ποσοστό αραίωσης που προέκυψε στην αυτόνομη μέθοδο VCR είναι αισθητά μικρότερο από αυτό της συνδυαστικής μεθόδου. Αυτό σημαίνει ότι η σχεδίαση ήταν πιο ακριβής και εξορύχθηκε λιγότερο στείρο πέτρωμα.
- Ο λόγος έργων προπαρασκευής προς τα έργα εκμετάλλευσης της αυτόνομης μεθόδου VCR προκύπτει αισθητά μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο της συνδυαστικής μεθόδου. Ο λόγος για αυτό είναι ότι τα έργα ανάπτυξης της αυτόνομης μεθόδου είναι αισθητά λιγότερα ενώ ταυτόχρονα τα έργα προπαρασκευής είναι περισσότερα.
- Οι απώλειες της αυτόνομης μεθόδου VCR επίσης ευθύνονται σε μεγάλο βαθμό για την μικρή τιμή του όγκου των έργων ανάπτυξης καθώς αποκλείουν ένα σημαντικό μέρος του κοιτάσματος από την εκμετάλλευση.
- Η ποσότητα της λιθογόμωσης που χρησιμοποιήθηκε στην αυτόνομη μέθοδο VCR είναι ελαφρώς λιγότερη σε σχέση με αυτήν της συνδυαστικής μεθόδου.

Με βάση τα παραπάνω, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η μέθοδος VCR μπορεί κάλλιστα να λειτουργήσει αυτόνομα σε ανταγωνιστικά σχετικά πλαίσια με μια συνδυαστική μέθοδο εκμετάλλευσης. Διαθέτει διάφορα πλεονεκτήματα όπως τα λιγιστά έργα προπαρασκευής και η ευκολία εξόρυξης σε συνδυασμό με την ασφάλεια που προσφέρει. Στην παρούσα διπλωματική εργασία τα έργα προπαρασκευής προέκυψαν σημαντικά μεγαλύτερα σε όγκο από ότι πιθανώς θα έπρεπε. Πιθανώς με μερικές τροποποιήσεις ιδιαιτέρως στα ύψη των διευθυντικών στοών θα υπήρχε μια μείωση του όγκου των έργων προσβολής.

Ταυτόχρονα, είναι σημαντικό να γίνει μια προσεκτική σχεδίαση των ανατινάξεων και μελέτη ως προς το συμφέρον εκμετάλλευσης σε σημεία όπου μπορεί να παρουσιαστούν μεγάλα ποσοστά αραίωσης. Όσον αφορά την μέθοδο VCR που λειτούργησε συμπληρωματικά της μεθόδου Drift n' Fill, παρουσίασε χαμηλό ποσοστό αραίωσης και προσαρμόστηκε ικανοποιητικά στο περιβάλλον της εκμετάλλευσης χωρίς να την επιβαρύνει με οποιονδήποτε τρόπο. Όσον αφορά τα περιθώρια βελτίωσης, ισχύουν οι ίδιες παρατηρήσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω για την αυτόνομη μέθοδο VCR.

5.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η παρούσα διπλωματική εργασία επιχείρησε να δώσει μια άποψη ενός σχεδίου εκμετάλλευσης με συνδυασμό δύο μεθόδων αλλά και με την αυτόνομη χρήση της μεθόδου VCR. Ασφαλώς, κατά τον σχεδιασμό μιας οποιασδήποτε εκμετάλλευσης ορυκτών πόρων, πόσο μάλλον υπόγειας, υπάρχουν πάρα πολλές πτυχές και παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη και να δοθούν λύσεις σε διάφορα προβλήματα. Η διπλωματική εργασία προφανώς δεν έδωσε απάντηση σε κάθε πτυχή του σχεδιασμού που πραγματεύτηκε. Όμως, έδωσε το έναυσμα ώστε να μελετηθεί η μέθοδος VCR ακόμα περισσότερο και να επιλυθούν διάφορα προβλήματα που υπάρχουν κατά την εφαρμογή της και στον παρόν σχεδιασμό. Μερικά από τα προβλήματα – πτυχές που είναι άξια έρευνας είναι:

- Το κύκλωμα αερισμού σε ένα μεταλλείο όπου εφαρμόζεται η μέθοδος VCR.
- Μια τεχνοοικονομική μελέτη στο παρόν μεταλλείο με εύρεση πραγματικών οικονομικών στοιχείων.
- Μελέτη της χρήσης κεκλιμένων διατηρημάτων στα μέτωπα της μεθόδου VCR.

- Μελέτη της υποστήριξης των χοανών και υπολογισμός του κινδύνου απόφραξης ή κατάρρευσης μιας χοάνης.
- Εύρεση και ορισμός παραγόντων για την οριακή χρήση της μεθόδου VCR καθώς δεν είναι δυνατό να ορυχθούν προπαρασκευαστικά έργα για ένα πολύ μικρό ύψος μετώπου.
- Γνωρίζοντας τον αριθμό των διατρημάτων, την διάμετρο τους και το μήκος τους (αφού το ύψος των μετώπων είναι καθορισμένο) δύναται να υπολογιστεί το σύνολο της εκρηκτικής ύλης που χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή της μεθόδου VCR σε κάθε περίπτωση.
- Εξέταση της στατικότητας των μετώπων και των επιπέδων τους, ιδιαίτερα στην αυτόνομη μέθοδο VCR, καθώς και των χώρων όπου εκ παραδοχής έχουν θεωρηθεί ευσταθείς όπως οι χώροι απόθεσης των λουκιών και τα συννεργεία.
- Εξέταση της αντοχής της λιθογόμωσης και στις δύο περιπτώσεις εφαρμογής της μεθόδου VCR.

Βιβλιογραφία

- Autodesk. (2018). *Autocad Civil 3D*. Ανάκτηση από <https://www.autodesk.com/products/civil-3d/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>
- Digistar. (2023). Ανάκτηση από <http://digistar.mb.ca/minsci/ug/vbm/vcr.htm>
- Epiroc. (2023). Ανάκτηση από <https://www.epiroc.com/en-gr>
- ERG Industrial. (2023). Ανάκτηση από <https://ergindustrial.com/>
- Extraco S.A. (2023). Ανάκτηση από <https://www.extraco.gr/>
- Feng Gao, X. L. (2023). Refined design and optimization of underground medium and long hole blasting parameters - A case study of the Gaofeng mine. *Mathematics*.
- GEOVIA, S. T. (2022). Integrated Geology, Resource Modeling, Mine Planning and Production 2022. Vélizy-Villacoublay, France: Dassault Systèmes GEOVIA Inc.
- Gertch, E. R., & Bullock, L. R. (1998). *Techniques in Underground Mining*. Society for Mining, Metallurgy and Exploration.
- Hamrin, H. (2001). *Underground Mining Methods and Applications*. Στο R. L. William A. Hustrulid, *Underground Mining Methods - Engineering Fundamentals and International Case Studies*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.
- Hustrulid, W. A. (2001). *Underground mining methods handbook*. New York: Society of Mining Engineers of AIME.
- iRing.inc. (2023). Ανάκτηση από <https://iring.ca/>
- Kelly, J., & England, R. (1987). Development of the automatic Go - 60 drill. *CIM Bulletin*.
- Kewei Liu, J. Y. (2018). Study on the long - hole raising technique using one blast based on vertical crater retreat multiple deck shots. *Elsevier*.

- L.C. Lang, R. R. (1977). Vertical crater retreat an important new mining method. *Canadian Mining Journal*.
- Lang, L. (1983). *A brief review of Livingston's Cratering Theory*. Stockholm, Sweden: SveDeFo Report DS.
- Laubscher, D. (1994). Cave mining - The state of the art. *The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*.
- Livingston, C. (1970). *U.S.A. Ευρεσιτεχνία Αρ. US3735704A*.
- Metallurgy, I. o. (1991). *African Mining '91*. Springer Dordrecht.
- Mitchell, S. (1980). Vertical Crater Retreat stoping proves succesful at Homestake mine. *Mining Engineering*.
- Morrison, G., & Orr, L. (2002). *Review of the geology and mineralisation in the Kulthor prospect for Osborne mines*.
- Muir, J. (1988). Sml block VCR mining at Homestake.
- Nan Jiang, C. Z. (2015). Damage characteristics of surrounding rock subjected to VCR mining blasting shock.
- Queens Mine Design Wiki*. (2023). Ανάκτηση από <https://minewiki.engineering.queensu.ca>
- Ramlu, M. A. (1996). *MINE HOISTING*. A.A. Balkema Publishers.
- Sandvik Group*. (2023). Ανάκτηση από <https://www.home.sandvik/en/>
- SSAB*. (2022). Ανάκτηση από <https://www.ssab.com/en/news/2022/12/epiroc-presents-worlds-first-underground-mine-truck-made-using-fossilfree-steel-from-ssab>
- Trotter, D. A. (1991). Vertical crater retreat mining in the Sudbury Basin. *Mining Science and Technology*, σσ. 131-143.
- Valenta, R. (2018). *NW Queensland Mineral Province Deposit Atlas Prototype Report – the Mount Isa and Ernest Henry Deposits. DNRME-GSQ Commissioned study and report*. Ανάκτηση από The University of Queensland: <https://smi.uq.edu.au/project/nw-mineral-province-deposit-atlas>

Xiaotan, S. (1985). Stability analysis and parameter optimization of VCR stopes.

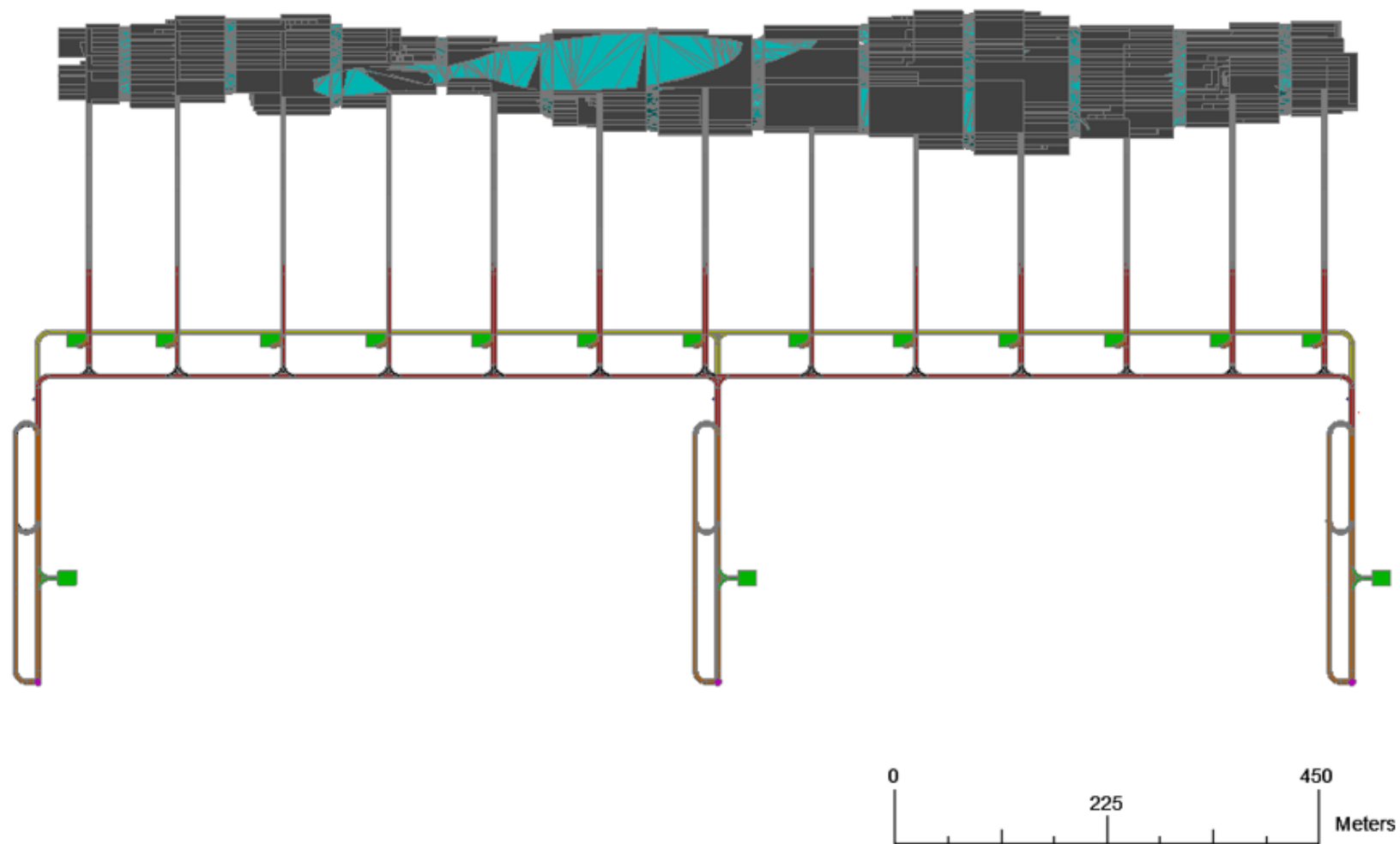
Αγιουτάντης, Ζ. (2019). *Στοιχεία Διάτρησης - Ανατίναξης*. Ίων.

Εξαδάκτυλος, Γ. Ε. (2005). *Σχεδιασμός συστημάτων υπόγειων έργων για την εκμετάλλευση μεταλλευτικών κοιτασμάτων*. Χανιά.

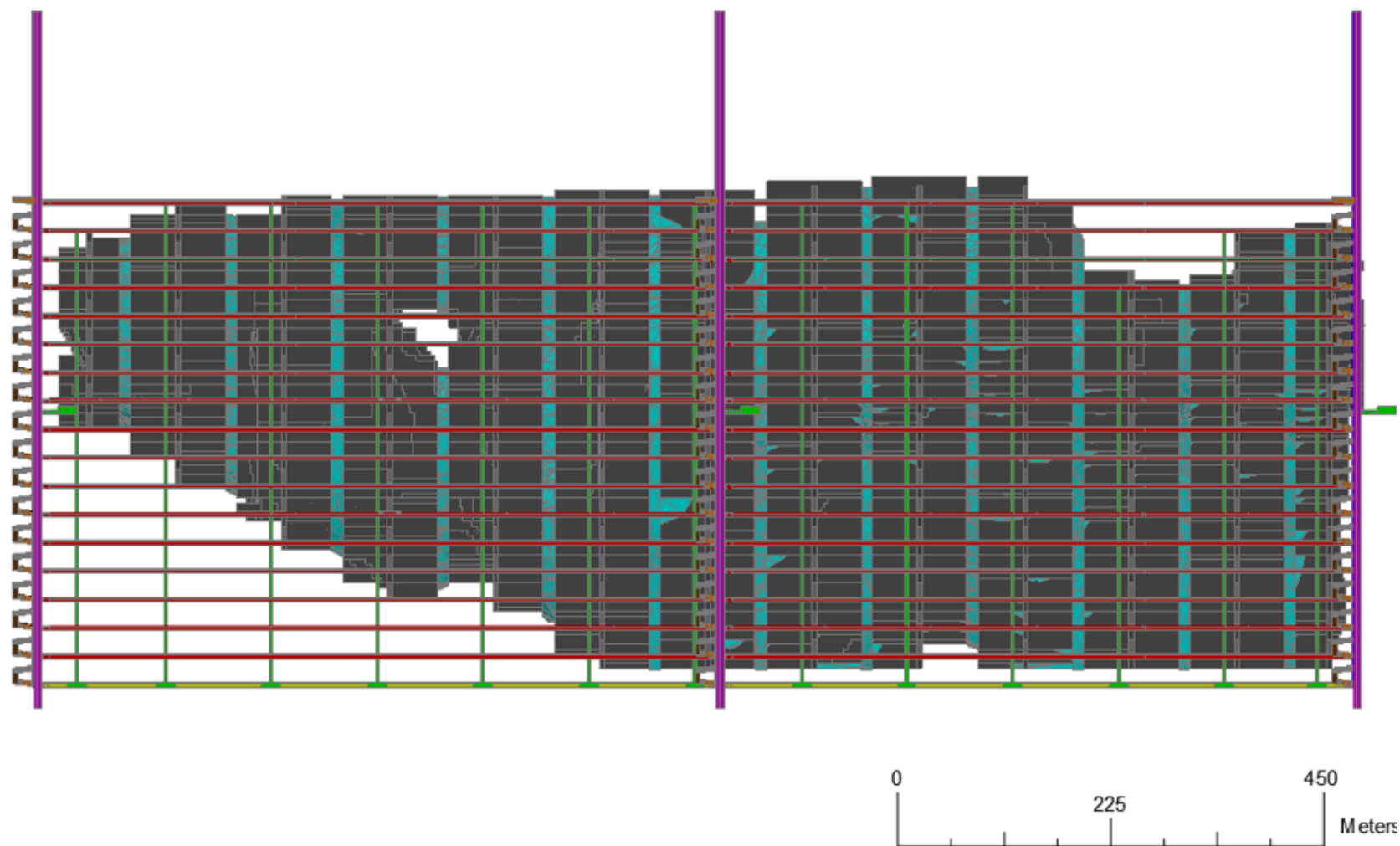
Οικονομόπουλος, Ι. Ν. (1989). *Εκμετάλλευσις Μεταλλείων - Προσπέλασις - Κατασκευή κύριων μεταλλευτικών έργων - Ανάπτυξις*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Παράρτημα Α: Τελικές τομές

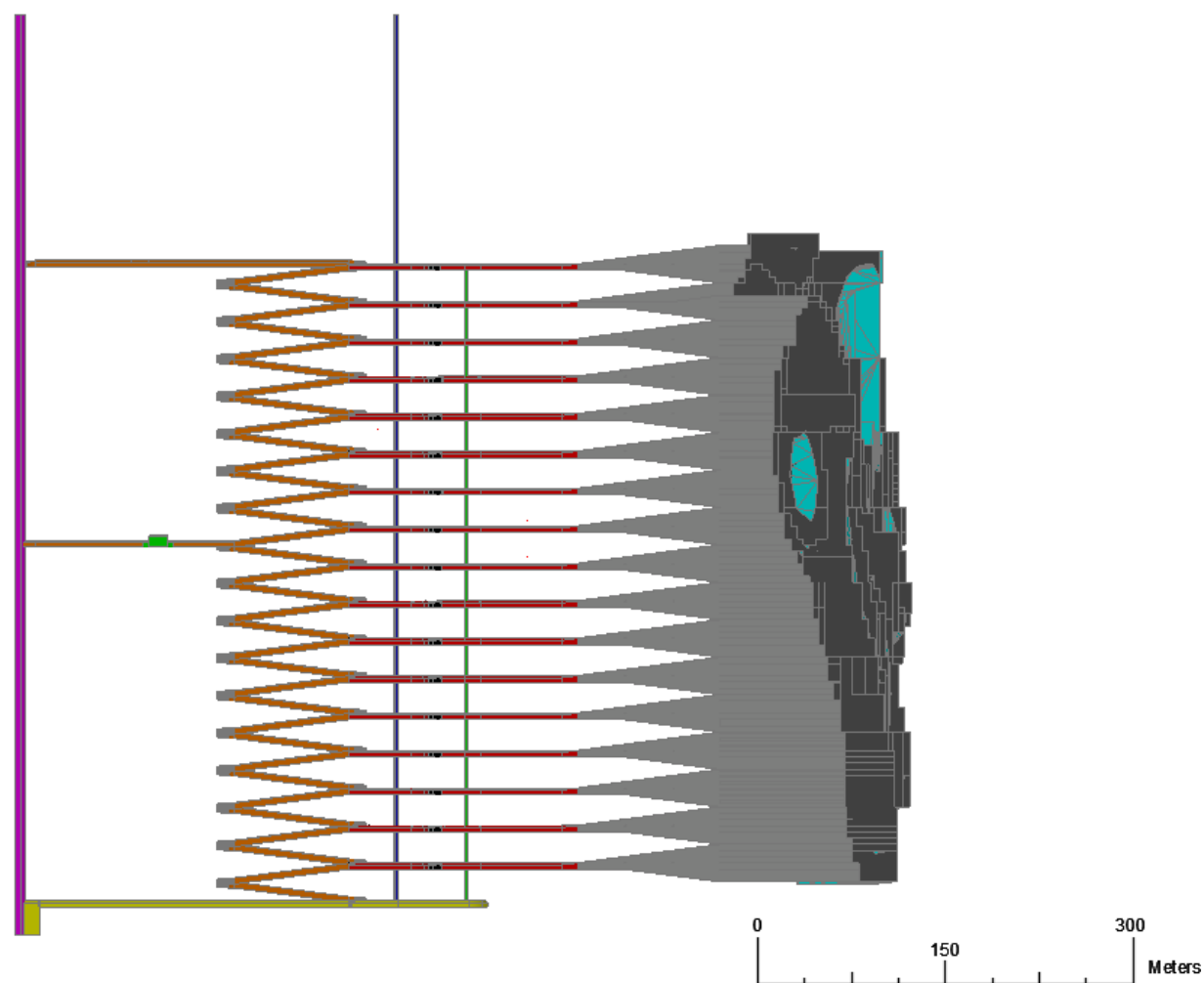
Στο παράρτημα αυτό παρατίθενται τα σχέδια των εκμεταλλεύσεων σε τελική μορφή υπό 4 διαφορετικές οπτικές γωνίες. Αρχικά παρουσιάζονται τα σχέδια της μεθόδου Drift n' fill.



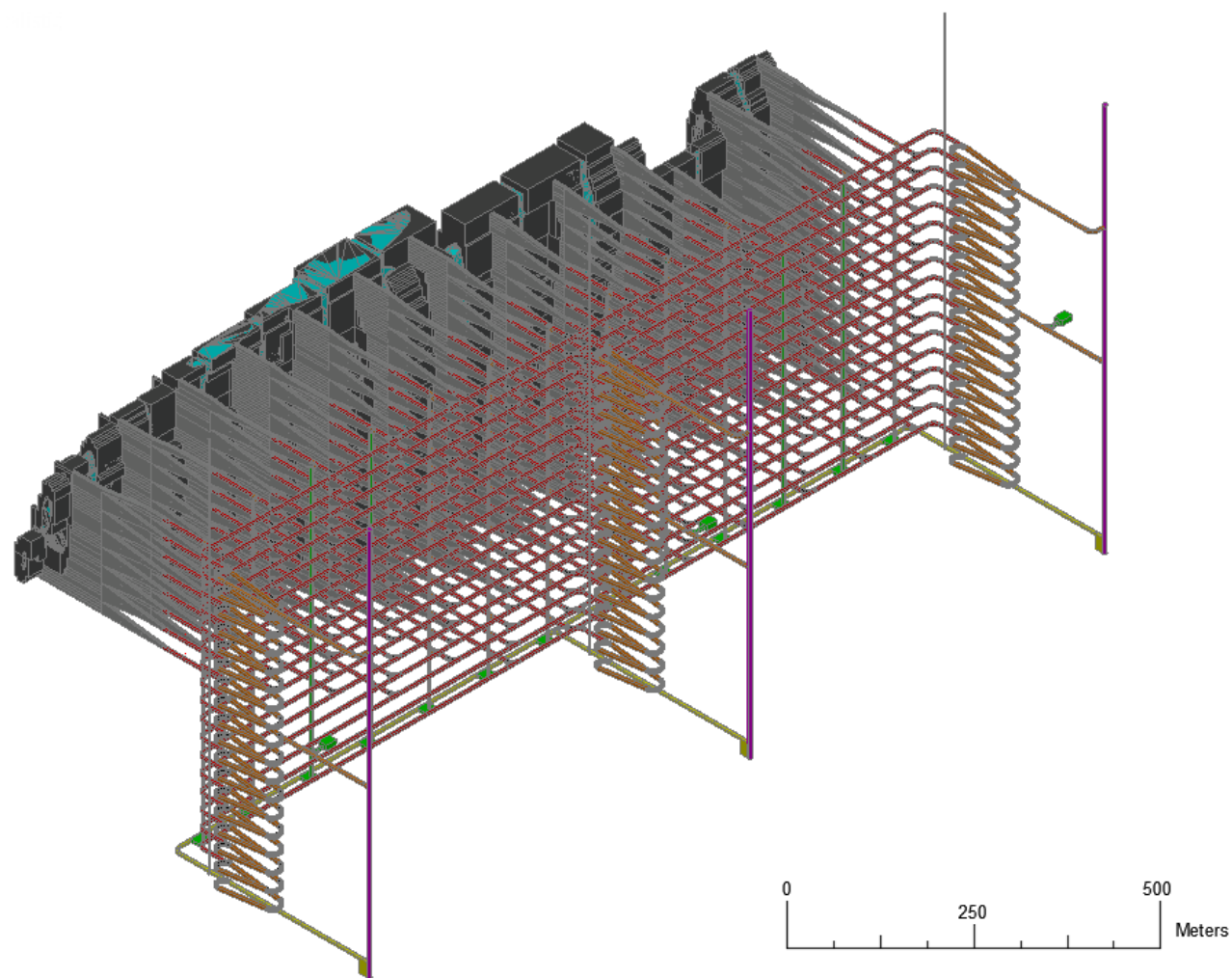
Σχήμα Α.0.1:Κάτοψη του συνόλου των έργων της μεθόδου Drift n' fill.



Σχήμα Α.0.2: Τομή κατά την παράταξη του συνόλου των έργων της μεθόδου Drift n' fill.

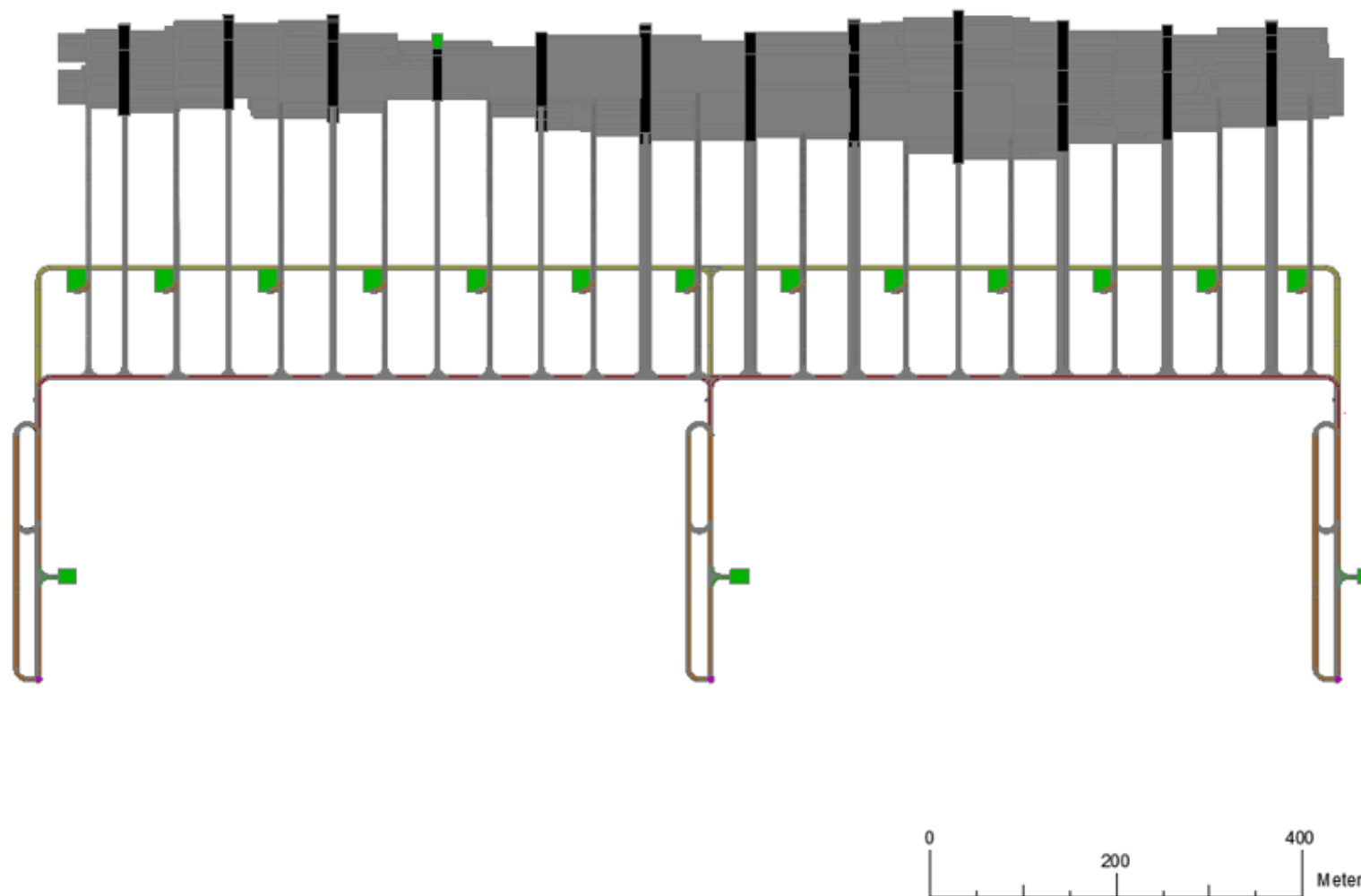


Σχήμα Α.0.3: Τομή κατά την κλίση του συνόλου των έργων της μεθόδου Drift n' fill.

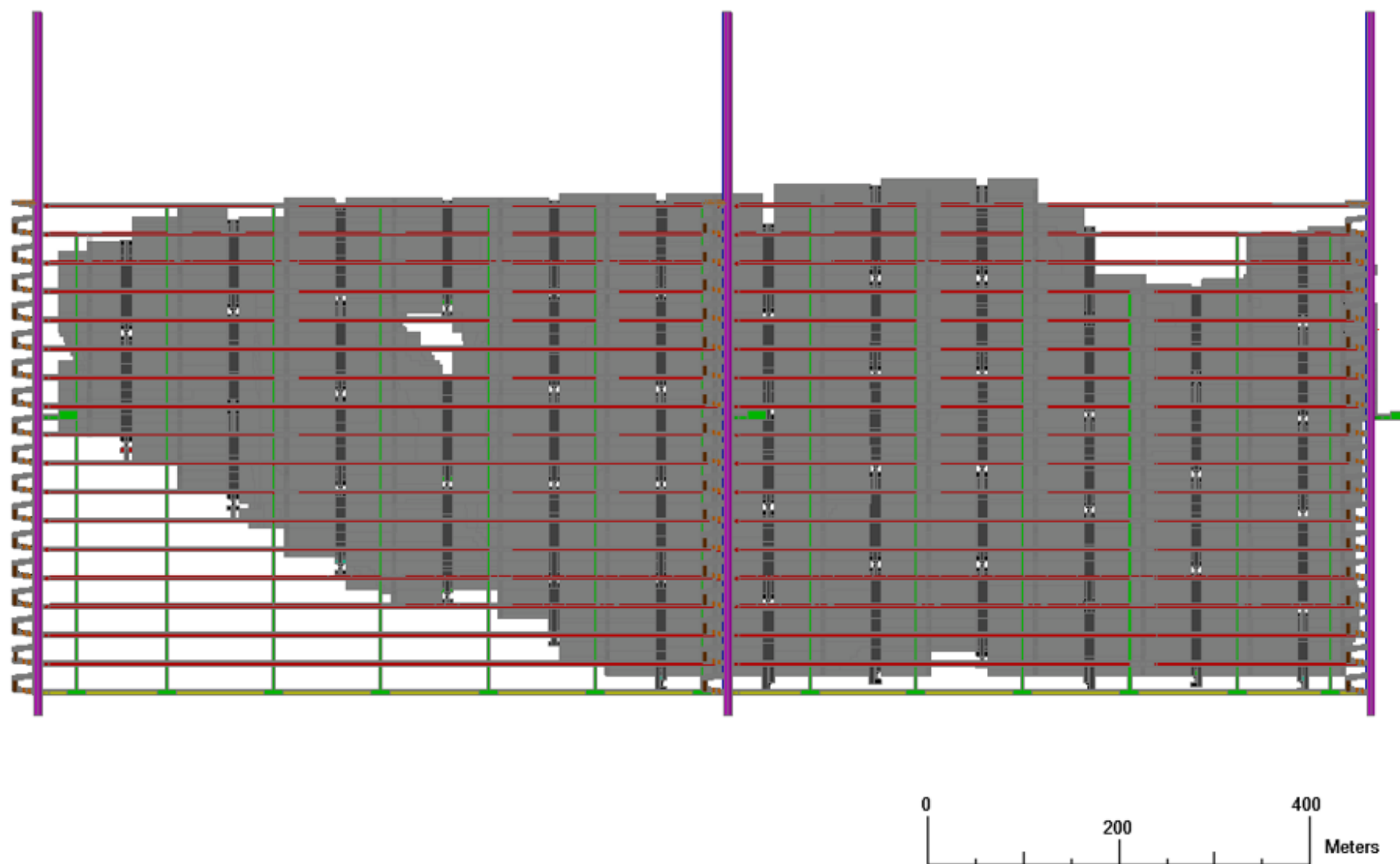


Σχήμα Α.0.4: Τρισδιάστατη απεικόνιση του συνόλου των έργων της μεθόδου Drift n' fill

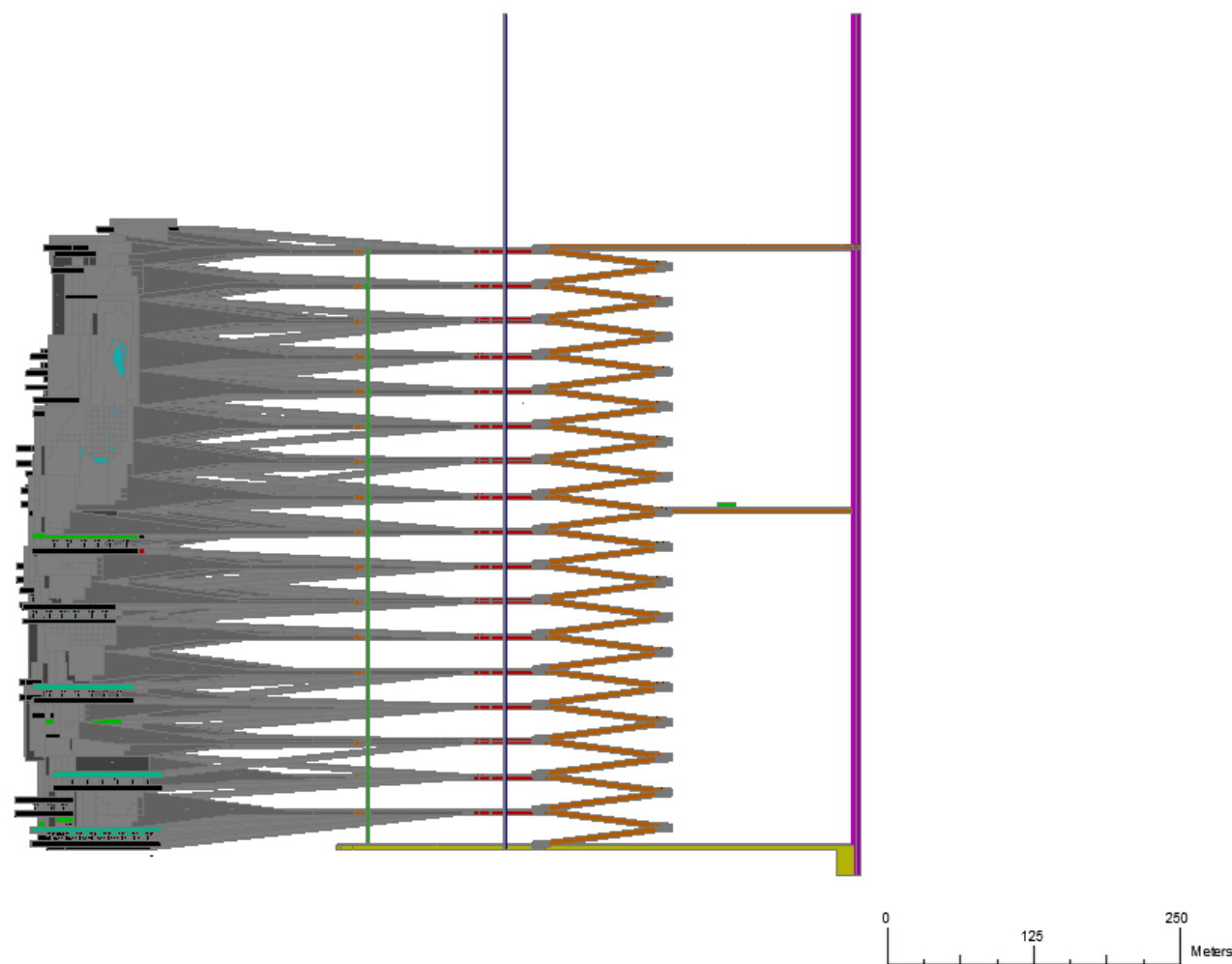
Εν συνεχεία παρουσιάζονται τα σχέδια της συνδυαστικής μεθόδου εκμετάλλευσης. Προστίθενται δηλαδή τα έργα της μεθόδου VCR.



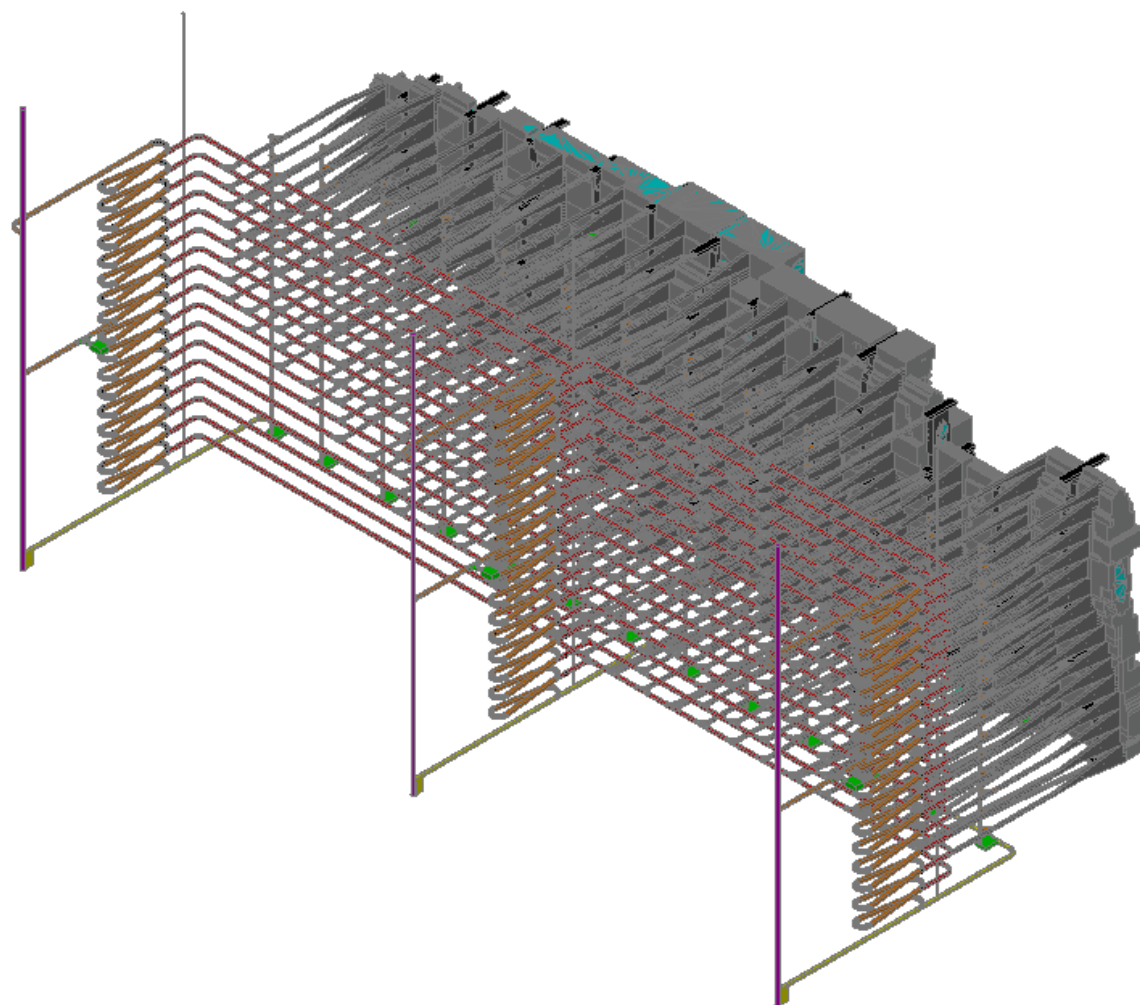
Σχήμα A.0.5:Κάτοψη του συνόλου των έργων της συνδυαστικής μεθόδου εκμετάλλευσης



Σχήμα Α.0.6:Τομή κατά την παράταξη του συνόλου των έργων της συνδυαστικής μεθόδου εκμετάλλευσης

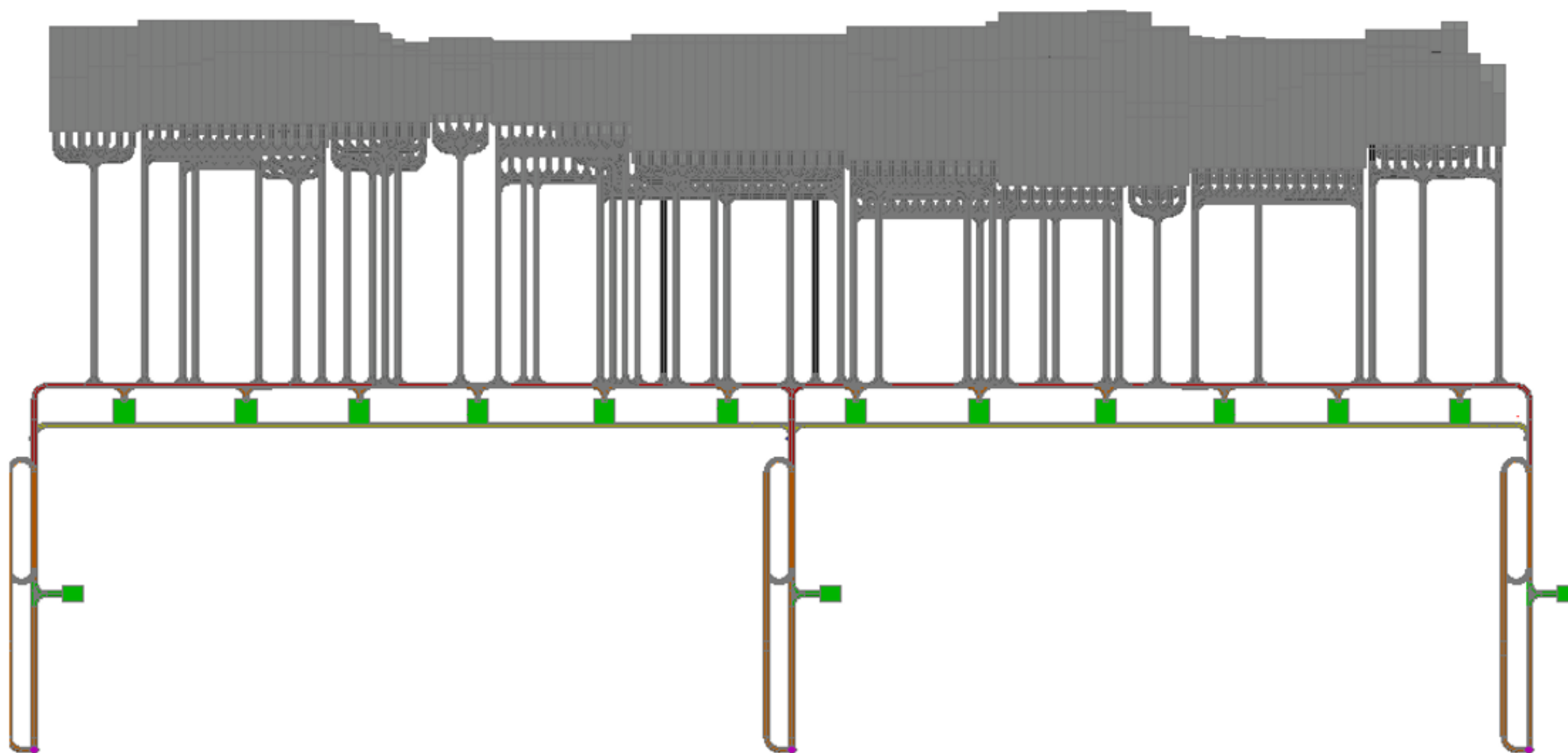


Σχήμα Α.0.7: Τομή κατά την κλίση του συνόλου των έργων της συνδυαστικής μεθόδου εκμετάλλευσης

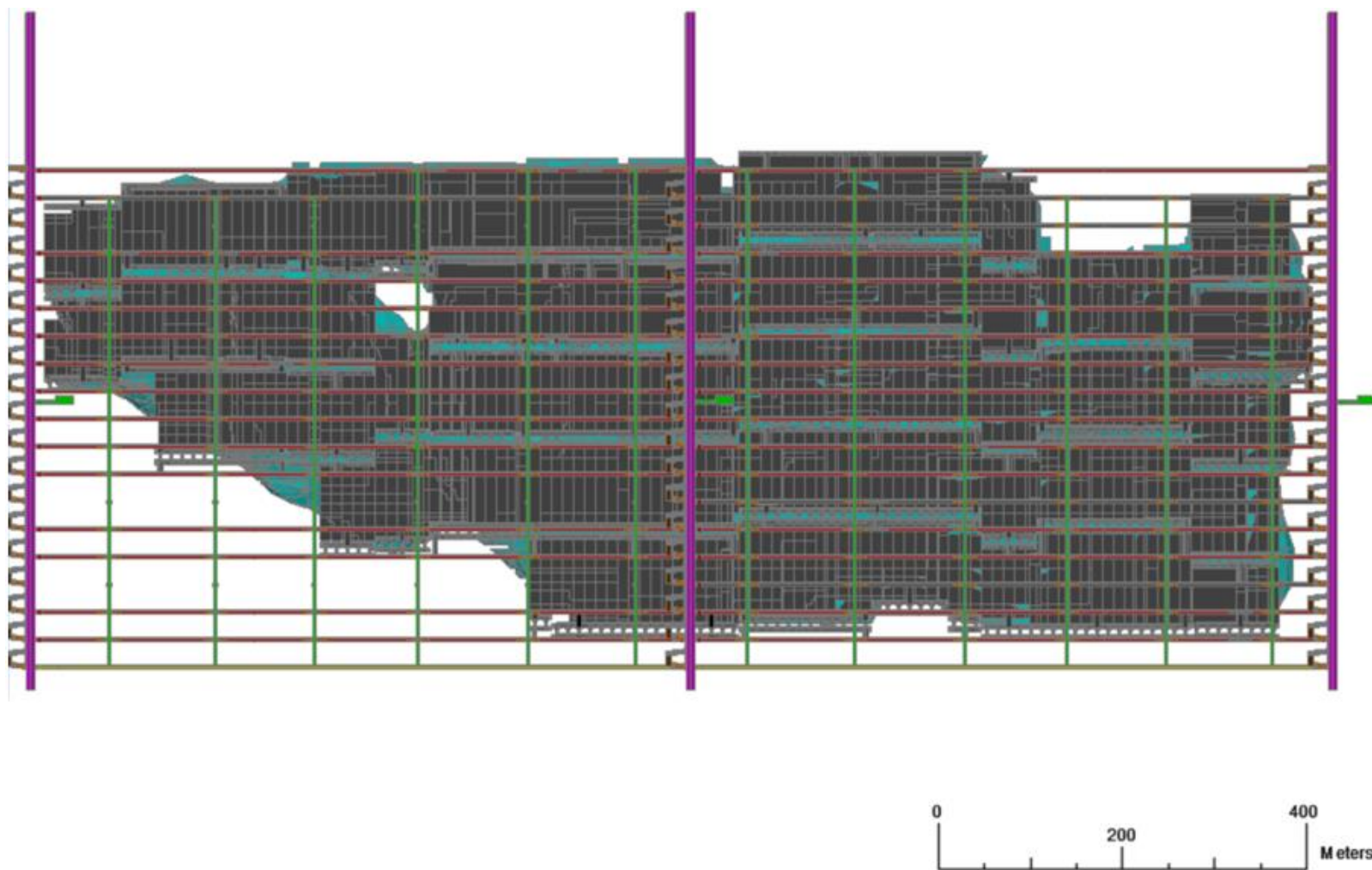


Σχήμα Α.0.8: Τρισδιάστατη απεικόνιση του συνόλου των έργων της συνδυαστικής μεθόδου εκμετάλλευσης.

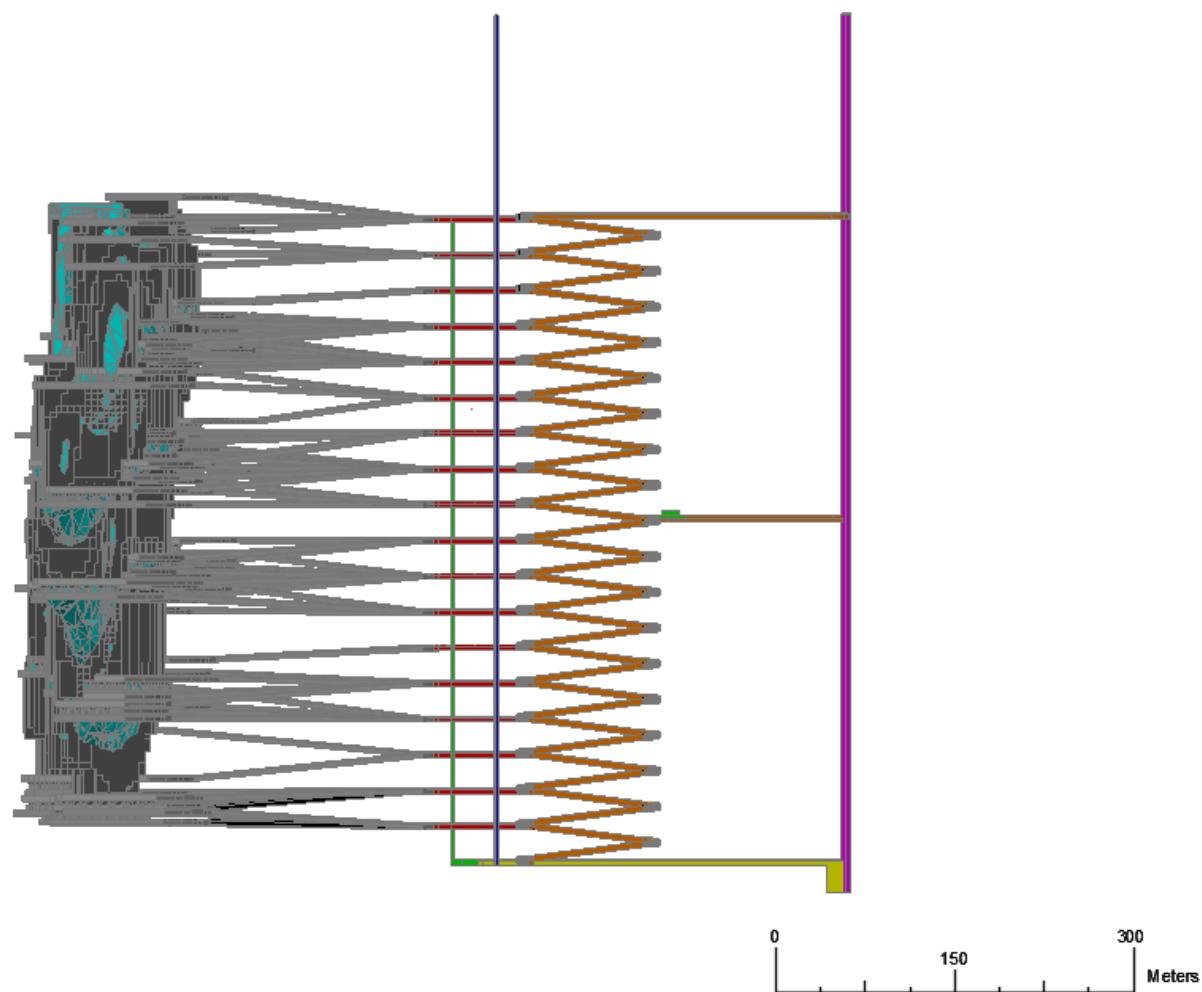
Εν τέλει παρουσιάζονται τα σχέδια της αυτόνομης μεθόδου VCR



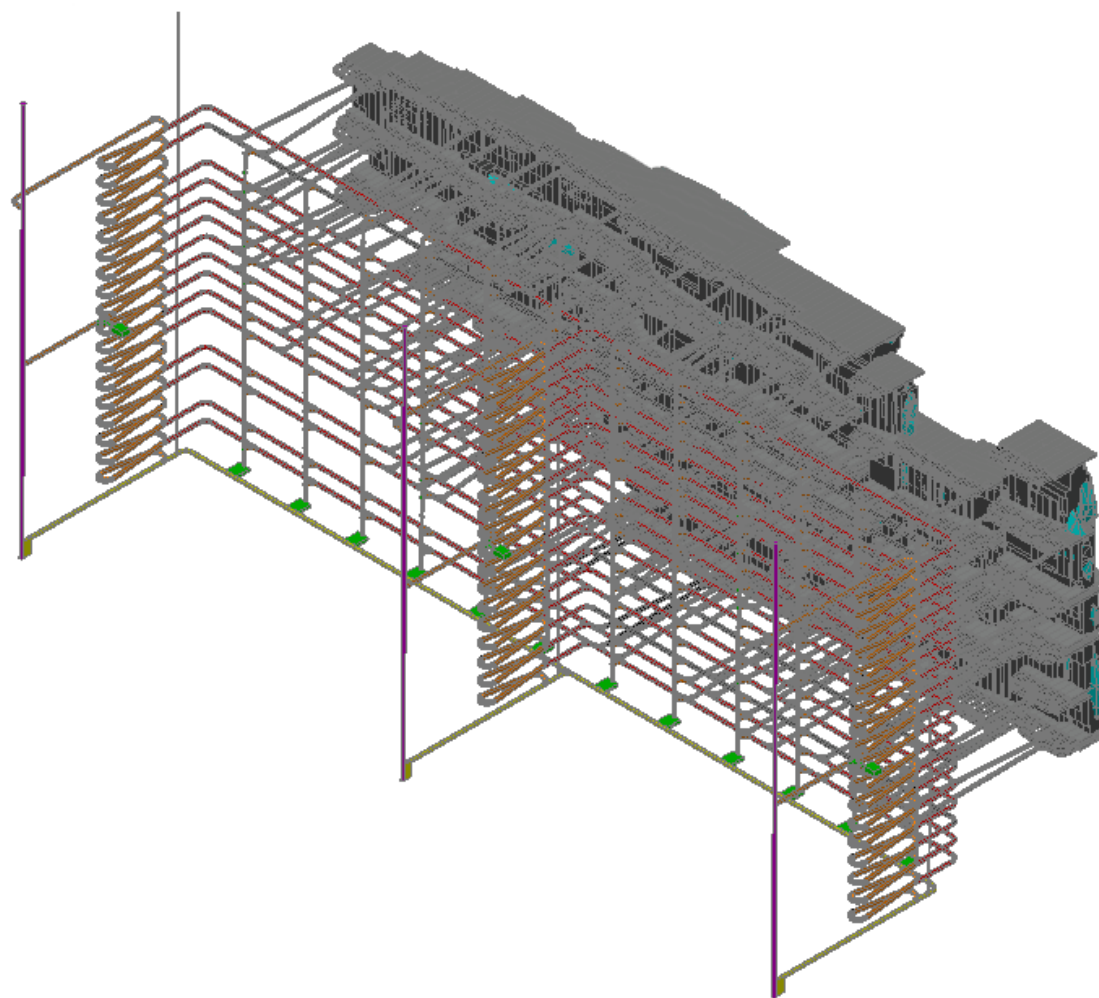
Σχήμα Α.0.9:Κάτοψη του συνόλου των έργων της αυτόνομης μεθόδου VCR



Σχήμα Α.0.10: Τομή κατά την παράταξη του συνόλου των έργων της αυτόνομης μεθόδου VCR.



Σχήμα Α.0.11: Τομή κατά την κλίση του συνόλου των έργων της αυτόνομης μεθόδου VCR



Σχήμα Α.0.12:Τρισδιάστατη απεικόνιση του συνόλου των έργων της αυτόνομης μεθόδου VCR