



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΜΑΡΙΑ ΤΑΦΤΣΟΓΛΟΥ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΜΗΧΑΝΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΕ ΚΑΡΣΤΙΚΟ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ: ΕΡΕΥΝΑ, ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΟΣ ΤΒΜ ΚΑΙ
ΘΕΜΑΤΑ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΚΑΡΣΤΙΚΩΝ ΚΕΝΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ Π.ΜΑΡΙΝΟΣ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2017



ΜΑΡΙΑ ΤΑΦΤΣΟΓΛΟΥ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΜΗΧΑΝΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΕ ΚΑΡΣΤΙΚΟ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ: ΕΡΕΥΝΑ, ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΟΣ ΤΒΜ ΚΑΙ
ΘΕΜΑΤΑ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΚΑΡΣΤΙΚΩΝ ΚΕΝΩΝ

Υποβλήθηκε στο τμήμα Γεωλογίας
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας

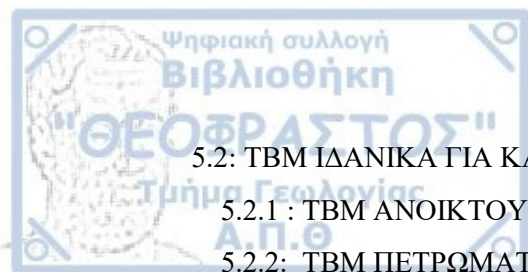
Επιβλέπων :

Καθηγητής : Βασίλειος Π. Μαρίνος



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ	v
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	vi
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	vi
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	ix
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ ΚΑΙ ΣΗΡΑΓΓΩΝ	1
1.2 ΣΚΟΠΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΚΑΡΣΤ, ΜΟΡΦΕΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ.....	4
2.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΡΣΤΙΚΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ.....	4
2.2 ΚΑΡΣΤΙΚΕΣ ΜΟΡΦΕΣ.....	5
2.2.1 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΚΑΡΣΤΙΚΕΣ ΜΟΡΦΕΣ	6
2.2.2 ΥΠΟΓΕΙΕΣ ΚΑΡΣΤΙΚΕΣ ΜΟΡΦΕΣ.....	10
2.3 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΡΣΤΙΚΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΡΣΤΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ ΣΕ ΜΙΑ ΠΙΘΑΝΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ.	21
3.1 ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ	21
3.2 ΙΧΝΗΘΕΤΗΣΕΙΣ	22
3.3 ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	22
3.4 ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ ΑΕΡΟΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ	26
3.5 ΔΙΑΤΡΗΣΕΙΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ.....	28
3.6 ΜΕΛΕΤΗ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ.....	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΟΥ-ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΑΙ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ	38
4.1: ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ-ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ.....	38
4.2: ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑ	52
4.3 ΑΠΟΦΥΓΗ ΚΑΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΩΝ ΚΑΡΣΤΙΚΩΝ ΚΕΝΩΝ	61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΥ ΤΥΠΟΥ TBM (TUNNEL BORING MACHINE).....	72
5.1 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ TBM - ΓΕΝΙΚΑ.....	72



5.2: TBM ΙΔΑΝΙΚΑ ΓΙΑ ΚΑΡΣΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	73
5.2.1 : TBM ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΤΥΠΟΥ	74
5.2.2: TBM ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ ΜΕ ΑΣΠΙΔΑ	75
5.2.3: TBM ΜΙΚΤΟΥ ΤΥΠΟΥ	76
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	89
 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	92



ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1 : Δακτυλογλυφές (rillenkarren)

Εικόνα 2.2: Αυλακοειδείς γλυφές (rinnenkarren)

Εικόνα 2.3: Καρστικό φρεαρ

Εικόνα 2.4: Καρστ πεδινής περιοχής, στο φαράγγι Añisclo στην Ισπανία

Εικόνα 2.5 : Δολίνες στην περιοχή Βορείου Otago, στην Νέα Ζηλανδία

Εικόνα 2.6: Κωνικό καρστ στην Κίνα, στην περιοχή Guizhou

Εικόνα 2.7: Η κεφαλή του TBM, όταν εντόπισε καρστικό σπήλαιο και σταμάτησε η λειτουργία του

Εικόνα 2.8: Το εσωτερικό του καρστικού σπηλαίου της σήραγγας Αποσελέμη

Εικόνα 2.9: Το καρστικό κενό το οποίο «άδειασε» στο εσωτερικό της σήραγγας.

Εικόνα 3.1: Κατανομή της καρστικοποιημένης έκτασης της λεκάνης Σίβας της Τουρκίας

Εικόνα 3.2: Χάρτης τοποθεσίας της σήραγγας και παρουσίας καταβοθρών

Εικόνα 3.3: Πιο λεπτομερής εικόνα των καταβοθρών που παρουσιάστηκαν κατά την κατασκευή και των εισροών νερού.

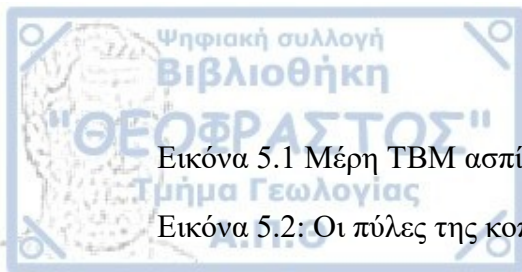
Εικόνα 3.4: Τα αποτελέσματα τις μεθόδου TSP στο ανατολικό μέτωπο της σήραγγας.

Εικόνα 3.5: Μέτωπο της σήραγγας κατά την διάρκεια κατασκευής της που απεικονίζει το παλαιοκαρστ ανάμεσα στην επαφή του σχιστολίθου και ασβεστολίθου

Εικόνα 4.1: Υδρογεωλογικός χάρτης του καρστικοποιημένου βουνού της Γκιόνας και η τομή της σήραγγας του υδραγωγείου Μόρνου-Αθηνών.

Εικόνα 4.2: Το υδρογεωλογικό μοντέλο του υδροφορέα υποδηλώνει ότι οι 2 φρεατικές ζώνες διαχωρίζονται από ένα αντίκλινο. Η βορειοδυτική ζώνη αναφέρεται στο τμήμα του υδροφόρου που υπόκειται του πλατώ Diesse. Σύμφωνα με το μοντέλο, η άνοδος της φρεατικής ζώνης είναι 455 m a.s.l. Η νότια φρεατική ζώνη αναπτύσσεται αναμεσα στους πρόποδες και τα παράλια, Η άνοδος της υπόγειας στάθμης είναι περίπου 435 m a.s.l. Ανάμεσα τους οι πηλόλιθοι αναπτύσσουν ένα στρώμα αδιαπέρατου υλικού που διαχωρίζει τις ζώνες. Παρόλα αυτά συμπεραίνονται δύο περάσματα από το μοντέλο, τα οποία επιτρέπουν και την ροή αντίθετα στο ρεύμα.

Εικόνα 4.3 Κατανομή γεωτρήσεων και δοκιμών άντλησης στην γραμμή 7 της σήραγγας Γκουανζού



Εικόνα 5.1 Μέρη TBM ασπίδας

Εικόνα 5.2: Οι πύλες της κοπτικής κεφαλής TBM μονής και διπλής ασπίδας

Εικόνα 5.3: Είδη σφραγισμάτων και συστήματος επισφράγισης

Εικόνα 5.4: Γεωλογικός χάρτης της κοιλάδας Alcedo

Εικόνα 5.5: Γεωγραφική τοποθεσία της πεδιάδας Alcedo και της κατασκευής του έργου

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: Κατηγοριοποίηση επιφανειακών και υπόγειων καρστικών μορφών.

Πίνακας 2.2: Κλάσεις ασβεστολίθου ανάλογα με τον βαθμό καρστικοποίησής του.

Πίνακας 4.1: Τα υδρογεωλογικά μοντέλα σε περιβάλλον ασβεστόλιθου.

Πίνακας 4.2: Τρόποι πρόληψης και αντιμετώπισης καρστικών κενών.

Πίνακας 5.1: Η στρωματογραφία του κεντρικού Τέξας και οι σήραγγες που διαπέρασαν συγκεκριμένες ενότητες πετρωμάτων

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1: Σχηματική απεικόνιση των μορφολογικών τύπων δολινών

Σχήμα 2.2 : Σχηματική απεικόνιση δολίνας και ουβάλας

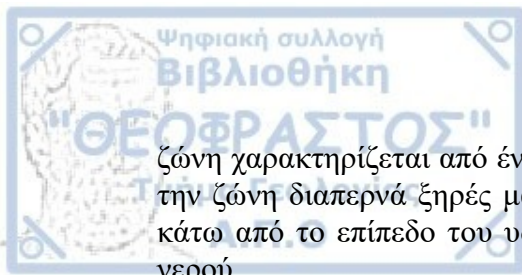
Σχήμα 2.3: Η κατηγοριοποίηση των καταβόθρων-δολινών, ανάλογα με τους μηχανισμούς του εδάφους και την φύση των υλικών που υποχωρούν και διαλύονται.

Σχήμα 2.4: Η σήραγγα Γκιώνας και οι καρστικοποίηση κατά μήκος της

Σχήμα 3.1: Το μοντέλο απεικόνισης των στρωμάτων του εδάφους που προέκυψε από τις ταχύτητες διάδοσης των σεισμικών κυμάτων. Ο οριζόντιος άξονας απεικονίζει την κατά μήκος απόσταση της τομογραφίας, ενώ ο κάθετος τα βάθη των μετρήσεων.

Σχήμα 4.1: Διαφορετικά παραδείγματα μοντέλων σήραγγών που κατασκευάζονται σε σπηλαιώδες περιβάλλον

Σχήμα 4.2: Ο καρστικός υδροφορέας μπορεί να χωριστεί σε 3 ζώνες. Την μη κορεσμένη, την ενδιάμεση ζώνη και την κορεσμένη. Η μη κορεσμένη ζώνη τοποθετείται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους και χαρακτηρίζεται από ξηρές διακλάσεις, κοιλότητες και αγωγούς. Το νερό κινείται σχεδόν κάθετα στην κατώτερη ενδιάμεση ζώνη. Κάτω από αυτές τις συνθήκες η σήραγγα διέρχεται από εντελώς ξηρές μάζες ασβεστολίθων με παρουσία καρστικών χαρακτηριστικών. Η ενδιάμεση



ζώνη χαρακτηρίζεται από έντονα καρστικοποιημένα πετρώματα . Η σήραγγα σε αυτή την ζώνη διαπερνά ξηρές μάζες πετρωμάτων. Τέλος η ζώνη κορεσμού τοποθετείται κάτω από το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα και χαρακτηρίζεται από συνεχή ροή νερού.

Σχήμα 4.3: 1η Περίπτωση - Σήραγγα σε μη κορεσμένη ζώνη μη καρστικοποιημένου ασβεστολίθου. "Μοντέλο Α"

Σχήμα 4.4: 1η περίπτωση - Σήραγγα κάτω από το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα μη καρστικοποιημένου ασβεστολίθου. "Μοντέλο Β"

Σχήμα 4.5: Περίπτωση 2.1 - Σήραγγα κάτω από το βασικό επίπεδο καρστικοποίησης

Σχήμα 4.6: Περίπτωση 2.2.1 - Σήραγγα στην ενδιάμεση ζώνη καρστικού υδροφορέα με μεγάλους καρστικούς αγωγούς - "Μοντέλο C"

Σχήμα 4.7 : Περίπτωση 2.2.1: Σήραγγα στην καρστικοποιημένη ζώνη του καρστικού υδροφορέα με μεγάλους καρστικούς αγωγούς. "Μοντέλο D"

Σχήμα 4.8: Περίπτωση 2.2.2 - Σήραγγα στην ενδιάμεση ζώνη ενός ανεπτυγμένου συστήματος διακλάσεων και ασυνεχειών μεγάλου μεγέθους, "Μοντέλο E"

Σχήμα 4.9: Περίπτωση 2.2 - Σήραγγα στην ενδιάμεση ζώνη ενός ανεπτυγμένου συστήματος διακλάσεων και ασυνεχειών μεγάλου μεγέθους, "Μοντέλο F"

Σχήμα 4.10 : Σχηματική απεικόνιση των 2 μοντέλων καρστικής διάβρωσης κατά μήκος της σήραγγας .

Σχήμα 4.11 : Υπόγεια υδραυλική κλίση της Γκιάνας κατά μήκος της σήραγγας

Σχήμα 4.12: Γεωλογικό μοντέλο τοποθεσίας σήραγγας Twann.

Σχήμα 4.13: Τα μοντέλα που σχεδιάστηκαν για την σήραγγα Twann.

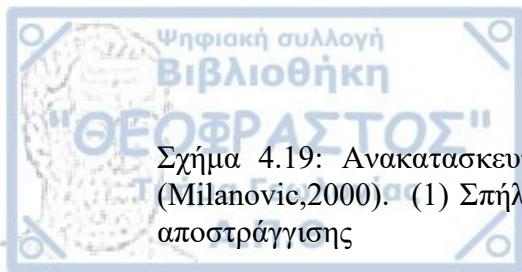
Σχήμα 4.14: Κατακόρυφη κατανομή στρωμάτων της σήραγγας Γκουανζού.

Σχήμα 4.15: Η διάβρωση του εδάφους λόγω της αποστράγγισης, της διαρροής και της εισροής νερού κατά την διάνοιξη της σήραγγας

Σχήμα 4.16: Καταβόθρες που προκλήθηκαν από την αστάθεια καρστικών σπηλαιών και του μετώπου της σήραγγας.

Σχήμα 4.17: Πέρασμα μέσα από μεγάλο καρστικό αγωγό με διάνοιξη (1) Καρστ, (2) Σήραγγα, (3) Στάθμη νερού στον αγωγό, (4) Επένδυση σήραγγας υπό την πίεση του νερού, (5) Αποστράγγιση γύρω από την σήραγγα.

Σχήμα 4.18: Πλήρωση σήραγγας με σκυρόδεμα για την διάνοιξη με TBM (Milanovic,2000). (1) Σπήλαιο, (2) Τμήμα σπηλαίου πληρωμένο με σκυρόδεμα, (3) Ασβεστόλιθος, (4) TBM.



Σχήμα 4.19: Ανακατασκευή σήραγγας με γεφύρωση για την διάνοιξη με TBM (Milanovic,2000). (1) Σπήλαιο, (2) πλάκα σκυροδέματος, (3) σύστημα εξαερισμού-αποστράγγισης

Σχήμα 4.20: Πλήρωση ενός σπηλαίου από το εσωτερικό της σήραγγας (Milanovic,2000). (1) TBM (2) αργιλικές αποθέσεις σπηλαίου, (3) άμμος, (4) Υποστήριξη σήραγγας, (5) άξονας, (6) σωλήνας συνδεδεμένος με την βαλβίδα σκυροδέματος, (7,8,9) στάδια σκυροδέτησης.

Σχήμα 4.21: Η τεχνολογία σκυροδέτησης της μαζικής εισροής νερού μπροστά από την κεφαλή κοπής του TBM.

Σχήμα 5.1: Κατηγορίες TBM



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο τη διερεύνηση της μηχανοποιημένης διάνοιξης σε καρστικό περιβάλλον και συγκεκριμένα την έρευνα, και τους τρόπους αντιμετώπισης των καρστικών κενών. Με βάση την ανάλυση αυτή γίνεται η αξιολόγηση της καταλληλότητας των μηχανημάτων μηχανοποιημένης διάνοιξης (TBM) κατά μήκος σήραγγας σε καρστικοποιημένο περιβάλλον.

Αρχικά, παρουσιάζεται το φαινόμενο της καρστικοποίησης και τα πετρώματα στα οποία αυτό παρατηρείται, οι μορφές που σχηματίζει και τα περιβάλλοντα δημιουργίας του. Στην συνέχεια γίνεται μια ανάλυση των μεθόδων που ακολουθούνται για την έρευνα της περιοχής που γίνεται η κατασκευή μιας σήραγγας, προκειμένου να επιτευχθεί μια ολοκληρωμένη γεωλογική μελέτη της θέσης του έργου. Οι μέθοδοι αυτές περιλαμβάνουν την γεωλογική χαρτογράφηση της περιοχής, την χρήση αεροφωτογραφιών, την εφαρμογή γεωτρήσεων και τις γεωφυσικές και υδρολογικές αναλύσεις. Τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας οδηγούν στην κατασκευή υδρολογικών και τεχνικογεωλογικών μοντέλων με βάση τα οποία θα μελετηθεί η πιθανή επικινδυνότητα κατά μήκος της σήραγγας. Ακολουθούν λοιπόν οι τρόποι με τους οποίους αντιμετωπίζονται τα καρστικά έγκοιλα και κενά προκειμένου να αποφευχθούν τυχόν κίνδυνοι κατά την διάρκεια κατασκευής και μετά το τέλος της υλοποίησης του έργου. Στην συνέχεια, με βάση τα παραπάνω στοιχεία, εξετάζεται η εφαρμοσιμότητα συγκεκριμένων τύπων μηχανοποιημένων μεθόδων διάνοιξης κατά μήκος της σήραγγας.

Τέλος, η εργασία ολοκληρώνεται με την εξαγωγή των συμπερασμάτων.



The specific thesis focus on the investigation of the mechanical excavation in karst environment and the research and treatment of the karstic voids. This analysis evaluates the suitability of Tunnel Boring Machines (TBM) along a tunnel in karstic conditions.

Initially, is exhibited the karst phenomenon, the rocks on which it is observed, the shapes it forms and the environment that creates it. Furthermore, an analysis is made about methods of investigation in the region of the construction, aiming the comprehensive geological study of the tunnel's location. These methods include geological mapping, use of aerial photographs, application of drilling and geophysical and hydrological analysis tests. The results of this investigation are hydrological and technical-geological models on the basis of which the potential hazard along the tunnel will be studied. In addition, the processes to deal with the karstic voids are proposed for the avoidance of dangers not only during the construction, but also after the completion of the tunnel. Having all these information, the applicability of specific types of mechanized drilling methods along the tunnel is examined.

In the end, thesis is completed by drawing important conclusions.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ ΚΑΙ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

Με την εξέλιξη της τεχνολογίας και της επιστήμης ο τομέας των υπόγειων έργων ξεκίνησε να αναπτύσσεται τις τελευταίες δεκαετίες. Η συνεχής αστικοποίηση και οι αυξημένοι ρυθμοί ζωής του ανθρώπου οδήγησαν στην ανάγκη της κατασκευής ενός μέσου που θα του επέτρεπε την ευκολότερη και ασφαλέστερη μετακίνηση και επικοινωνία του ακόμη και σε περιοχές δυσπρόσιτες .

Οι σήραγγες κατασκευάζονται για την μετακίνηση οχημάτων, για σιδηροδρομική χρήση, ως υδραγωγεία για την μεταφορά νερού, για υδροηλεκτροπαραγωγή και ως αποχετευτικοί χώροι. Επίσης επιτρέπουν την δίοδο πεζών, ενώ κατασκευάζονται ακόμη και σήραγγες που είναι κατάλληλες για την μετακίνηση ζώων που βρίσκονται υπό εξαφάνιση.

Σε εθνικό επίπεδο η μορφολογία του ελληνικού χώρου χαρακτηρίζεται ως έντονη. Η παρουσία μεγάλου αριθμού ορεινών όγκων δυσχεραίνει την ευκολία της μετακίνησης και επικοινωνίας, περιορίζει την δυνατότητα ανάπτυξης οικονομικών και εμπορικών σχέσεων και υποβαθμίζει την ποιότητα ζωής των ανθρώπων. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τον περιορισμένο χρόνο στην καθημερινότητα του ανθρώπου οδήγησε στην διάνοιξη στο εσωτερικό των ορεινών όγκων των σιηράγγων. Θεωρήθηκαν προτιμότερη λύση τόσο για λόγους περιβαλλοντικούς, αφού διαταράζουν λιγότερο το περιβάλλον σε σύγκριση με τα ορύγματα, όσο και για λόγους αισθητικούς.

Τα σημαντικότερα υπόγεια έργα που έχουν κατασκευαστεί στην Ελλάδα σήμερα βρίσκονται στην Αθήνα (Αττική οδός, Αττικό Μετρό), αλλά και στην περιφέρεια (Εγνατία Οδός, ΠΑΘΕ, Μετρό Θεσσαλονίκης) με την κατασκευή τους να συνεχίζεται μελλοντικά.

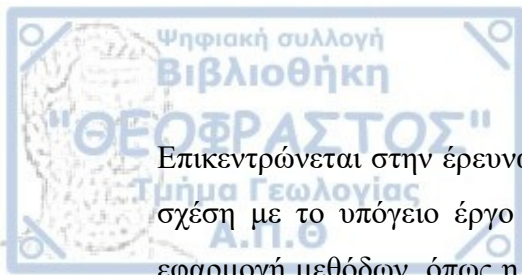
Η κατασκευή μιας σήραγγας προϋποθέτει μια ολοκληρωμένη μελέτη του γεωλογικού υλικού που την περιβάλλει, προκειμένου να αποφευχθούν προβλήματα κατά την διάρκεια κατασκευής της και μετά την υλοποίησή της, τα οποία θα καθυστερήσουν την πρόοδό, το κόστος της και την αρχική της μελέτη. Η Ελλάδα αποτελεί μια ενδιαφέρουσα και ιδιαίτερη περίπτωση για την κατασκευή υπόγειων έργων, αφού

παρουσιάζει πλούσιο ανάγλυφο, με την παρουσία και τις εναλλαγές διαφόρων πετρωμάτων και έντονη τεκτονική. Παρατηρείται λοιπόν μια ετερογένεια και ποικιλία ως προς την σύσταση και την αντοχή των πετρωμάτων της, γεγονός που καθιστά δυσκολότερη την πρόβλεψη των γεωλογικών συνθηκών που θα εντοπιστούν κατά την διάνοιξη.

Τα πιο χαρακτηριστικά πετρώματά της Ελλάδας, τα οποία παρουσιάζονται σε μεγάλη ποικιλία είναι τα ανθρακικά.. Πρόκειται για θαλάσσια ιζήματα που σχηματίστηκαν σε μικρά βάθη, συνήθως 200 - 500 m και σπανιότατα μέχρι 3000 - 4000 m. Σε μεγαλύτερα βάθη, λόγω της υψηλής διαλυτότητας του ασβεστίτη στο θαλάσσιο νερό, δεν δημιουργείται ασβεστολιθική ιζηματογένεση. Οι ασβεστόλιθοι λοιπόν δημιουργήθηκαν σε μια υφαλοκρηπίδα που είχε σχηματισθεί στα περιθώρια μιας γειτονικής ηπείρου, η οποία βρισκόταν βορειότερα και προφανώς αντιστοιχούσε στην Ευρωπαϊκή Πλάκα. Σχηματίστηκαν κυρίως κατά το Μεσοζωικό αιώνα (Τριάσιοι, Ιουράσιοι και Κρητιδικοί ασβεστόλιθοι) και μαζί με τα παλαιογενή στρώματα μέχρι και του μέσου φλύσχη αποτελούν τα εκτός των κρυσταλλοπαγών μαζών όρη της Ελλάδας. Οι κορυφές των ορέων των νησιών του Ιονίου, της Ηπείρου και της Ακαρνανίας (Αδριατικο-Ιόνιος περιοχή), της Πίνδου, των Αγράφων, του Τυμφρηστού, των Τζουμέρκων, των Αιτωλικών ορέων, της Τρίπολης, του Πάρωνα και κατά το μέγιστο τα όρη της Κρήτης, αποτελούνται από ασβεστόλιθους. Πρόκειται για πετρώματα που παρουσιάζουν διαφορετικές αντοχές, ιδιαίτερα στην περίπτωση που έχουν υποστεί καρστικοποίηση. Ανήκουν λοιπόν σε μια κατηγορία που η ετερογένεια που μπορεί να παρουσιάζουν τα καθιστά δύσκολα στην διαχείριση τους στην περίπτωση της κατασκευής μιας σήραγγας. Οι σήραγγες Γκιώνας, Δωδώνης και Αποσελέμη αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα υπόγειων έργων σε τέτοιο περιβάλλον. Επομένως κρίνεται απαραίτητος ο άρτιος σχεδιασμός τους για την ασφαλή λειτουργία τους.

1.2 ΣΚΟΠΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Το κύριο αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η εξέταση των γεωλογικών συνθηκών της περιοχής που πρόκειται να κατασκευαστεί μια σήραγγα, στις οποίες περιλαμβάνονται καρστικοποιημένα πετρώματα και καρστικοί σχηματισμοί.



Επικεντρώνεται στην έρευνα και μελέτη των καρστικών μορφών, στην θέση τους σε σχέση με το υπόγειο έργο και στην επιρροή που θα ασκήσουν σε αυτό. Με την εφαρμογή μεθόδων, όπως η γεωλογική χαρτογράφηση της περιοχής και η χρήση του Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών GIS και της αεροφωτογραφίας γίνεται μια γενική ανάλυση της περιοχής κατασκευής του έργου, ενώ στην πορεία με την γεωφυσική έρευνα και τις γεωτρήσεις μελετώνται οι καρστικοί σχηματισμοί σε βάθος και καταγράφονται τα πιθανά καρστικά κενά και οι διακλάσεις που θα επηρεάσουν το έργο. Η καρστική μορφολογία συνδέεται άμεσα με την υδρογεωλογία της περιοχής, επομένως μελετώνται οι υδρογεωλογικές συνθήκες και παράμετροι της θέσης του έργου. Η κατασκευή υδρογεωλογικών και τεχνικογεωλογικών μοντέλων σε συνδυασμό με την εφαρμογή μιας κατάλληλης σειράς μεθόδων για την αντιμετώπιση των καρστικών κενών και σπήλαιων, όπως η ενεμάτωση, το εκτοξευμένο σκυρόδεμα, η χαλύβδινη ομπρέλα, οι δοκοί προπορείας, οι διατρήσεις ανίχνευσης και παρακολούθησης και τα αποστραγγιστικά συστήματα, θα συμβάλλουν στον άρτιο σχεδιασμό του υπόγειου έργου και στην ασφαλή λειτουργία του. Τέλος αξιολογείται ο κατάλληλος τύπος μηχανήματος TBM, για την μηχανοποιημένη εκσκαφή σε ένα περιβάλλον ετερογενές και με ιδιαίτερη δυσκολία, όπως είναι το καρστικό.

Για την εκπόνηση της διπλωματικής αυτής εργασίας αξιοποιήθηκαν πληροφορίες, από επιστημονικές δημοσιεύσεις, εντοπισμένες στα πλαίσια κατασκευής μηχανοποιημένων σηράγγων σε περιοχές που έχουν υποστεί καρστικοποίηση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΚΑΡΣΤ, ΜΟΡΦΕΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

2.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΡΣΤΙΚΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

Ως καρστ χαρακτηρίζονται οι επιφανειακές και υπόγειες δομές που δημιουργούνται από την διαλυτική δράση του νερού στα ανθρακικά πετρώματα, όπως ο ασβεστόλιθος, ο δολομίτης, η γύψος, το μάρμαρο.

Στις περισσότερες καρστικές περιοχές, το μεγαλύτερο ποσοστό διάλυσης συμβαίνει στην ζώνη κοντά στην επιφάνεια και ραγδαία μειώνεται σε βάθος όσο ο βαθμός κορεσμού αυξάνεται. Συγκεκριμένα, το νερό ανάλογα με την θερμοκρασία του (χαμηλές θερμοκρασίες-μεγάλος βαθμός διάλυσης), προσλαμβάνει διοξείδιο του άνθρακα από την ατμόσφαιρα ή το έδαφος και διαλύει τα ανθρακικά άλατα του ασβεστίου και μαγνησίου, μετατρέποντάς τα σε διαλυτά όξινα ανθρακικά άλατα. Στην συνέχεια, το ανθρακικό οξύ επιδρά στον ασβεστίτη και παράγει δυσόξινο ανθρακικό ασβέστιο, το οποίο μεταφέρεται διαλυμένο στο νερό. Απελευθερώνοντας διοξείδιο του άνθρακα και νερό και αποθέτοντας ασβεστίτη ολοκληρώνεται η διαδικασία της καρστικής διάβρωσης.

Η προέλευση της οξύτητας του νερού εκτός από μετεωρική, μπορεί να σχηματίζεται και επιτόπου στο έδαφος, με την οξείδωση των σουλφιδίων όπως ο πυρίτης, ή να προέρχεται από ανερχόμενα υγρά πλούσια σε διοξείδιο του άνθρακα και υδρόθειο. Αυτά τα ανερχόμενα νερά μπορεί να οδηγήσουν κάποιες φορές στην δημιουργία υπογενετικών σπηλαιων, κάποια από τα οποία δημιουργούνται από υγρά εμπλουτισμένα σε διοξείδιο του άνθρακα (π.χ Black Hills, Νότια Dakota) ή θειικό οξύ (π.χ βουνά Guadalupe, Μεξικό). Στην περίπτωση της υπογενετικής καρστικοποίησης, η διάλυση μπορεί να δημιουργήσει εκτεταμένες μάζες σπηλαιολογικών συστημάτων σε περιοχές που εκλείπει η τυπική επιφανειακή καρστική μορφολογία.

Τα χαρακτηριστικά καρστικά πετρώματα τα οποία επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από την δράση του νερού είναι:

- Οι ασβεστόλιθοι (CaCO_3) και κυρίως οι αμιγείς ασβεστόλιθοι με ποσοστά $\text{CaCO}_3 > 90\%$
- Οι δολομίτες ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), οι οποίοι είναι πιο ανθεκτικοί στην καρστική διάβρωση.
- Η γύψος (CaSO_4), η οποία είναι ιδιαίτερα διαλυτή.
- Τα ανθρακικά μεταμορφωμένα, όπως το μάρμαρο

Στα καρστικά περιβάλλοντα, η επιφανειακή και η υποεπιφανειακή διάλυση ξεπερνά την μηχανική διάβρωση δημιουργώντας μια ξεχωριστή μορφολογία και υδρολογία στην περιοχή η οποία αναλύεται στο κεφάλαιο που ακολουθεί.

2.2 ΚΑΡΣΤΙΚΕΣ ΜΟΡΦΕΣ

Οι καρστικοί σχηματισμοί διαφοροποιούνται αρχικά με βάση την επιφανειακή και υπόγεια κατανομή τους σε δύο μεγάλες κατηγορίες των επιφανειακών και υπόγειων καρστικών μορφών, ενώ οι πρώτες διαχωρίζονται βάση την έκταση της κάθε καρστικής μορφής (Πίνακας 2.1).

Πίνακας 2.1: Κατηγοριοποίηση επιφανειακών και υπόγειων καρστικών μορφών.

Επιφανειακές καρστικές μορφές		Υπόγειες καρστικές μορφές
Μικρές καρστικές μορφές	Μεγάλες καρστικές μορφές	Καταβόθρες
Γλυφές	Δολίνες	Υπόγειοι Οχετοί
Επιφανειακές χύτρες-καρστικά φρέατα	Ουβάλες	Σπήλαια
	Πόλγες	Έγκοιλα

2.2.1 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΚΑΡΣΤΙΚΕΣ ΜΟΡΦΕΣ

Α) Μικρές επιφανειακές καρστικές μορφές

Γλυφές

Πρόκειται για μικρές αυλακώσεις μεγέθους χιλιοστού έως εκατοστού, οι οποίες δημιουργούνται στα ανθρακικά πετρώματα λόγω της διαλυτικής ικανότητας τους νερού. Ανάλογα με το μέγεθός τους, τον σχηματισμό τους και την σχέση της επαφής του νερού με την επιφάνειά τους διακρίνονται σε:

α) δακτυλογλυφές (tillenkarren) : σχηματίζονται από τις σταγόνες της βροχής που προσκρούουν και ρέουν επάνω στην επιφάνεια του ανθρακικού πετρώματος. Η έκτασή τους εξαρτάται από την κλίση της επιφάνειας του πετρώματος (εικόνα 2.1).

β) μαιανδροειδείς γλυφές (meanderkarren) : πρόκειται για μια πιο περίπλοκη μορφή δακτυλογλυφών, ελικοειδούς σχήματος που οφείλεται στην χαμηλή ταχύτητα ροής του νερού.

γ) αυλακοειδείς γλυφές (rinnekarren) : όταν οι βροχοσταγόνες παγιδεύονται στις αυλακώσεις του ανθρακικού πετρώματος, τότε σχηματίζονται αυλακοειδείς γλυφές (εικόνα 2.2).



Εικόνα 2.1: Δακτυλογλυφές (Πηγή: Martin Mergili)



Εικόνα 2.2: Αυλακοειδείς γλυφές (Πηγή: Mike Simms)

Επιφανειακές χύτρες-καρστικά φρέατα

Πρόκειται για τον σχηματισμό μικρών κοιλοτήτων που πληρώνονται με νερό, διαβρώνονται και διευρύνονται πλευρικά. Η διατομή τους δεν υπερβαίνει τα 100m, ενώ ως προς το βάθος μπορεί να καταλήγουν και κάτω από την επιφάνεια (εικόνα 2.3).



Εικόνα 2.3: Καρστικό φρεαρ (πηγή: www.geologikathemata.blogspot.gr)

B) Μεγάλες καρστικές μορφές

Δολίνες

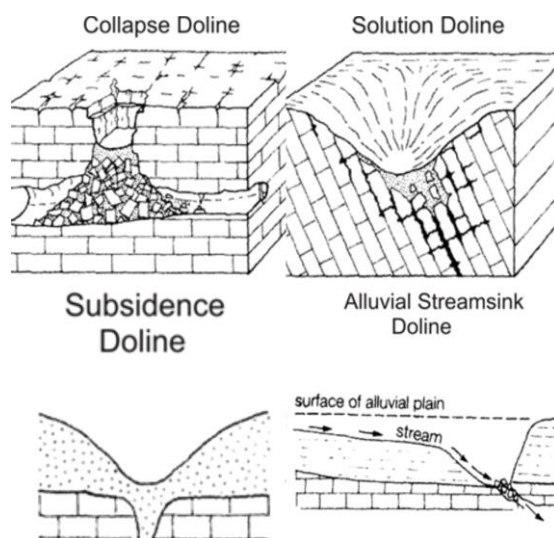
Είναι κλειστές λεκάνες με μεγαλύτερο μήκος απ' ότι πλάτος. Ο πυθμένας αυτών των λεκανών είναι συνήθως πληρωμένος με χημικά ιζήματα με αποτέλεσμα αυτά πολλές φορές να αποτελούν εμπόδιο στην υπόγεια απορροή. Οι περισσότερες δολίνες συνδέονται άμεσα με το υπόγειο καρστικό σύστημα. Συγκεκριμένα, πρόκειται για την αρχική μορφή των καταβοθρών, οι οποίες αποτελούν προέκταση των δολίνων και μεταφέρουν το κατεισδύον νερό σε καρστικούς υδροφορείς .

Οι δολίνες ανάλογα με την μορφολογία και μορφομετρία τους κατηγοριοποιούνται σε τέσσερις κατηγορίες (Σχήμα 2.1)

- Δολίνες από διάλυση (solution dolines): Είναι συνήθως κωνικές, ωστόσο το σχήμα τους εξαρτάται από την τοπική λιθολογία και τις δομικές τους συνθήκες. Σχηματίζονται στην ζώνη στην οποία διασταυρώνονται οι αγωγοί του πετρώματος και επιτρέπουν την διήθηση του επιφανειακού νερού. Όσο

περισσότερο νερό διαρρέει την ζώνη τόσο αυξάνονται τα κενά που διαπερνά με αποτέλεσμα να αυξάνεται και η ποσότητά του. Πλευρικά οι δολίνες αυτές είναι καλυμμένες με υλικό ίδιο με αυτό της επιφάνειας, ενώ σε βάθος καλύπτονται από αλλεπάλληλες ενστρώσεις πηλών που καλύπτονται από υλικά χρώματος καφέ. Τα μεγέθη τους κυμαίνονται στην κλίμακα των μερικών μέτρων

- Δολίνες από κατάρρευση (Collapse dolines): Σχηματίζονται συνήθως από την κατάρρευση μιας σπηλιάς η οποία δημιουργήθηκε με υπόγεια διάλυση. Ως προς το σχήμα τους χαρακτηρίζονται από απότομες πλευρές και γωνιώδες σχήμα. Το βάθος τους είναι συνήθως μεγαλύτερο από τις απλές δολίνες διάλυσης, ενώ αν η κατάρρευσή τους δεν συνεχιστεί σε μεγάλο βαθμό, μπορεί να διαβρωθούν και να μοιάζουν με δολίνες διάλυσης.
- Δολίνες από καθίζηση (subsidence dolines): Σχηματίζονται όταν τα βυθίσματα που δημιουργούνται επάνω στα καρστικά πετρώματα είναι καλυμμένα με επιφανειακές πυκνές αποθέσεις. Αυτές οι δολίνες μπορούν επίσης να σχηματιστούν και μέσα σε ένα συνεχές δίκτυο αγωγών.
- Αλλουβιακές δολίνες (alluvial streamsink doline): Σχηματίζονται σε αλλούβια υλικά στο σημείο στο οποίο ένα ρεύμα νερού βυθίζεται βαθύτερα μέσω ενός αγωγού.



Σχήμα 2.1: Σχηματική απεικόνιση των μορφολογικών τύπων δολινών.. (Jennings 1985)

Όταν το ανθρακικό πέτρωμα διαλυθεί σε έναν μεγαλύτερο βαθμό τότε το σύνολο των δολίνων του ενώνονται μεταξύ τους με αποτέλεσμα να σχηματίζουν μεγαλύτερες λεκάνες, ακανόνιστου σχήματος, τις ουβάλες. Ακόμη δεν αποκλείεται στο εσωτερικό μιας ουβάλας να αναπτυχθεί ένα καινούριο σύστημα δολινών.

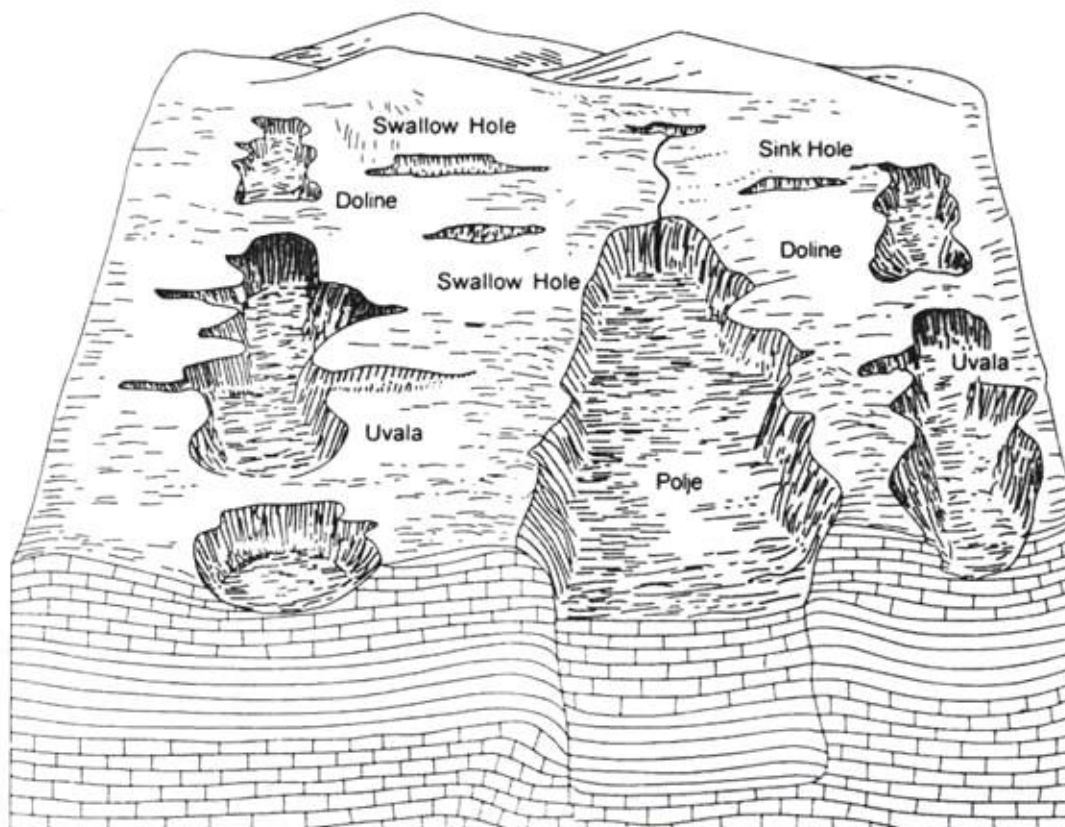


Fig. 19.6 : Development of sink holes, swallow holes, uvalas, sinking creek, blind valley and karst valley.

Σχήμα 2.2 : Σχηματική απεικόνιση δολίνας, ουβάλας και καταβόθρας (Karst Topography: Meaning, Distribution and Landforms | Geography, Article shared by :Sirisha P)

Πρόκειται για μεγάλες κλειστές επίπεδες λεκάνες που παρατηρούνται τόσο σε υψηλά όσο και χαμηλά υψόμετρα. Τα περιθώριά τους έχουν απότομες κλίσεις, ενώ τα επιφανειακά νερά αποστραγγίζονται μέσω καταβοθρών και υπόγειου δικτύου αποστράγγισης στην θάλασσα ή ως καρστικές πηγές στις πλαγιές βουνών.

2.2.2 ΥΠΟΓΕΙΕΣ ΚΑΡΣΤΙΚΕΣ ΜΟΡΦΕΣ

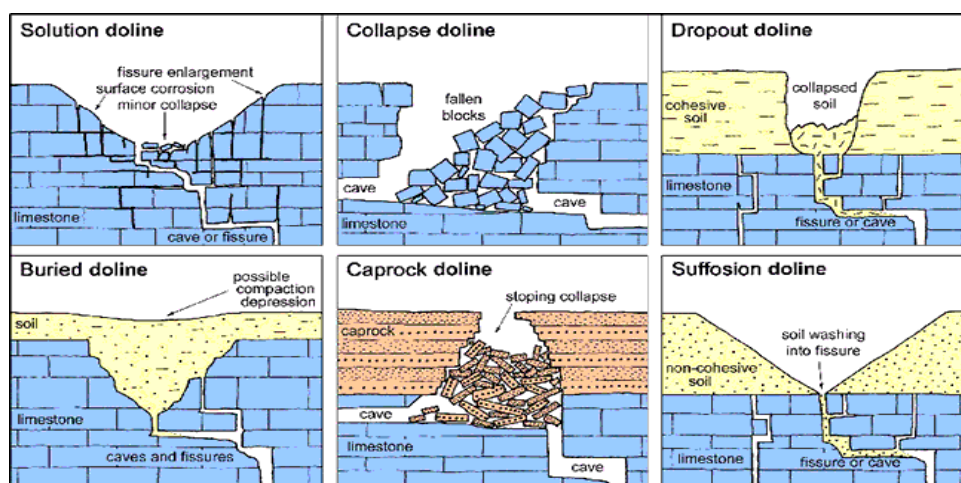
Οι υπόγειες καρστικές μορφές είναι αυτές που σχηματίζονται σε μεγαλύτερα βάθη, παρουσιάζουν αγωγιμότητα στην δράση του νερού και μπορούν να διευρύνονται διαρκώς υπό την προϋπόθεση ότι η διάλυση τους είναι ταχύτερη από αυτήν που συμβαίνει στην επιφανειακή ζώνη. Η διατομή των μορφών αυτών βασίζεται τόσο στις υδραυλικές δυνάμεις όσο και στην παρουσία διακλάσεων και ρωγμών στο πέτρωμα.

Καταβόθρες

Πρόκειται για καρστικούς αγωγούς οι οποίοι αποτελούν την προέκταση των επιφανειακών δολινών σε μεγαλύτερα βάθη, εκτείνονται δηλαδή από την επιφάνεια μέχρι τις υπόγειες ζώνες. Παρατηρούνται συνήθως στο εσωτερικό καρστικών λεκανών και δέχονται επιφανειακά και υπόγεια νερά. Ακριβώς επειδή πρόκειται για μια ανεπτυγμένη μορφή δολινών, σύμφωνα με τους μηχανικούς οι δολίνες και οι καταβόθρες ταυτίζονται. Οι καταβόθρες διαχωρίζονται σε έξι κατηγορίες, ορισμένες ίδιες με αυτές των δολινών, η κάθε μια από τις οποίες διακρίνεται με βάση των μηχανισμό σχηματισμού της (Σχήμα 2.3)

- καταβόθρες διάλυσης (dissolution sinkholes): σχηματίζονται από την αργή διάλυση του ασβεστολίθου σε συνδυασμό με μικρής κλίμακας καταρρεύσεις που τον κάνουν ορατό στην επιφάνεια.
- καταβόθρες κατάρρευσης (collapse sinkholes) : σχηματίζονται από άμεση ή σταδιακή αποδυνάμωση και κατάρρευση της οροφής του ασβεστολίθου ενός σπηλαίου ή μιας ομάδας μικρότερων σπηλαίων.

- Καταβόθρες από κατάρρευση υπερκείμενων πετρωμάτων (caprock sinkholes): Πρόκειται για την κατάρρευση ενός αδιάλυτου υπερκείμενου πετρώματος που βρίσκεται πάνω σε ένα καρστικό σπήλαιο, μέσα στον υποκείμενο ασβεστόλιθο.
- Καταβόθρες κατάρρευση συνεκτικών υλικών (dropout sinkholes) : Σχηματίζονται σε συνεκτικά εδαφικά καλύμματα, όπου το νερό της βροχής κατεισδύει και ξεπλένει το έδαφος σε σχισμές και κοιλότητες του υποκείμενου ασβεστόλιθου. Ραγδαία αποδυνάμωση της επιφάνειας συμβαίνει όταν το έδαφος καταρρέει σε ένα κενό το οποίο με αργούς ρυθμούς μεγεθύνεται και γεμίζει με το υλικό.
- Καταβόθρες καθίζησης(suffosion sinkholes): Αναπτύσσονται σε μη συνεκτικά εδαφικά καλύμματα, όπου το νερό της βροχής έχει ξεπλύνει το εδαφικό υλικό σε σχισμές και κοιλότητες στον υποκείμενο ασβεστόλιθο. Η αργή καθίζηση της επιφάνειας του εδάφους συμβαίνει όταν το έδαφος αρχίζει να βυθίζεται, σχηματίζοντας έναν κώνο, ενώ το υπόλοιπο υλικό ξεπλένεται στον υποκείμενο ασβεστόλιθο.
- Θαμμένες καταβόθρες (buried sinkholes): Σχηματίζονται όταν παλιότερες καταβόθρες διάλυσης ή κατάρρευσης, γεμίζουν με εδαφικό υλικό, ιζήματα ή ακόμα και υλικό της ίδιας της κατάρρευσης, λόγω κάποιας μεταβολής στο περιβάλλον.



Σχήμα 2.3: Η κατηγοριοποίηση των καταβόθρων-δολίνων, ανάλογα με τους μηχανισμούς του εδάφους και την φύση των υλικών που υποχωρούν και διαλύονται.. (T. Waltham 2005)

Ως σπήλαιο ορίζεται οποιαδήποτε φυσική κοιλότητα στο εσωτερικό της γης, η οποία έχει μέγεθος που να καλύπτει την πρόσβαση του ανθρώπου. Όταν το μέγεθος αυτής είναι μικρότερο τότε πρόκειται για έγκοιλο.

Οι βασικοί παράγοντες σπηλαιογένεσης είναι οι υδρογεωλογικές συνθήκες, η λιθολογία του πετρώματος και η τεκτονική του. Ο υπόγειος υδροφορέας ανάλογα με τις γεωλογικές παραμέτρους της περιοχής, εξελίσσεται, ενώ εμπλουτίζεται και από επιφανειακό νερό που κατεισδύει μέσω κάποιων πιθανών ασυνεχειών. Όταν το νερό αυτό έρθει σε επαφή με ένα ανθρακικό πέτρωμα, προκαλεί την καρστική διάβρωσή του, δημιουργώντας αρχικά ένα υπόγειο καρστικό έγκοιλο και στην συνέχεια ένα σπήλαιο.

Ένα σπήλαιο μπορεί να χαρακτηρίζεται από την παρουσία ρεμάτων νερού, την ολική ή μερική απόθεση κλαστικών ιζημάτων ή σχηματισμών σταλαγμιτών, ενώ δεν είναι λίγες οι φορές που λόγω ασταθειών στην οροφή του, μπορεί να παρατηρηθούν καταρρεύσεις της οροφής του. Ωστόσο, η γεωμετρία και η έκτασή του δεν μπορούν να προσδιοριστούν εύκολα, γεγονός που αποτελεί πολλές φορές εμπόδιο στην κατασκευή έργων υποδομής.

2.3 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΡΣΤΙΚΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

Το καρστ παρουσιάζει μια περίπλοκη και συνεχώς μεταβαλλόμενη εξάπλωση στον χώρο με συστήματα διαρρήξεων, ρωγμώσεων και κενών που διαπερνούν την επιφάνεια και τις μάζες των ανθρακικών πετρωμάτων. Η καρστική διάλυση των πετρωμάτων λαμβάνει κυρίως χώρα σε τρεις ζώνες, την επιφανειακή που περιλαμβάνει σχηματισμούς της επιφάνειας, την ενδιάμεση ζώνη που υπόκειται της επιφανειακής και τέλος την υπόγεια ζώνη. Η εξέλιξη της καρστικής μορφολογίας επηρεάζεται από το είδος του ανθρακικού πετρώματος, την έκτασή του και την γεωμετρία του σε βάθος, ενώ οι κλιματικές συνθήκες της περιοχής και η παρουσία υπόγειων νερών επηρεάζουν την ταχύτητα διάβρωσής του. Παρατηρείται λοιπόν μια κατηγοριοποίηση των καρστικών σχηματισμών ανάλογη των συνθηκών της περιοχής.

- Παγετώδες καρστ: Παρατηρείται σε μεγαλύτερα υψόμετρα και γεωγραφικά πλάτη, που έχουν διαβρωθεί και αποσαθρωθεί από τις παγετώδη Πλειστοκαινική περίοδο. Αποτελείται από εκτεθειμένους και μεγάλης έκτασης ασβεστολίθους και φαράγγια. (π.χ Yorkshire Dales of England)
- Καρστ πεδινής περιοχής: Πρόκειται για την ανάπτυξη καρστ σε περιβάλλον όπου κυριαρχούν κοιλάδες που διαρρέονται από ποταμούς. Αυτό δημιουργείται είτε πριν την δημιουργία σπήλαιων, είτε λόγω της μειωμένης περατότητας λόγω παγετώδους εδάφους. Και στις δύο περιπτώσεις οι πεδιάδες ξηραίνονται, όσο η ανάπτυξη του καρστ ευνοεί την υπόγεια αποστράγγιση. Παρατηρείται στις ψυχρές φάσεις του Πλειστοκαίνου. (εικόνα 2.5) (π.χ Derbysire Peak of England)
- Καρστ δολινών: Χαρακτηρίζεται από μια κοιλάδα που παρουσιάζει ορισμένα ρέματα, έχει ωστόσο καλυφθεί κυρίως από καταβόθρες μεγέθους 100-1000m. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι πλέον όλη η απορροή είναι υπόγεια. Πρόκειται για ένα ώριμο γεωλογικά τοπίο που αναπτύσσεται σε εύκρατο και μεσογειακό κλίμα (εικόνα 2.6)(π.χ κλασσικό καρστ Σλοβενίας)
- Κωνικό καρστ: κυριαρχείται από επαναλαμβανόμενους κωνικούς ή ημισφαιρικούς ασβεστολιθικούς λόφους, 30-100m, μεταξύ των οποίων παρατηρούνται καταβόθρες και πόλγες . Σχηματίζεται σε ενδοτροπικά κλίματα (εικόνα 2.7) (π.χ Fengcong areas of Guizhou, China)



Εικόνα 2.4: Καρστ πεδινής περιοχής, στο φαράγγι Añisclo στην Ισπανία (Πηγή: Fernando Biarge)

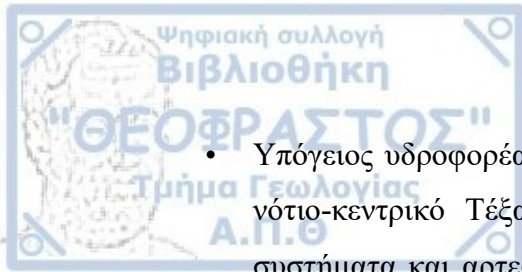


Εικόνα 2.5 : Δολίνες στην περιοχή Βορείου Otago, στην Νέα Ζηλανδία (Πηγή:Lloyd Homer)



Εικόνα 2.6: Κωνικό καρστ στην Κίνα, στην περιοχή Guangzhou(Πηγή: CNTV.CN)

- Καρστικοί πύργοι : περιοχές που αποτελούνται από υψηλούς μεμονωμένους πύργους καρστικών πετρωμάτων με απότομες πλευρές και ύψη που φτάνουν 50-100m επάνω από καρστικές πεδιάδες. Περιορίζεται σε υγρές τροπικές περιοχές με σημαντική τεκτονική ανύψωσης που επέτρεψε την διαρκή και συνεχή εξέλιξη των δομών (the Guilin and Yangshuo region of Guangxi (China).
- Ανθρακικό καρστ γεωσύγκλινων: σχηματίστηκε στις μεγάλες ιζηματογενείς λεκάνες και στην συνέχεια εκτέθηκε στις διαδικασίες της ηπειρογένεσης και της ορογενετικής πτύχωσης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το καρστ που σχηματίστηκε στον ωκεανό της Τιθύος και περιλαμβάνει τρεις κατηγορίες: το παράκτιο, που περιλαμβάνει νησιά και ακτογραμμές της βόρειας Αφρικής και τον κοντινών ανατολικών χωρών, το λοφώδες, με πόλγες και καρστικές κοιλάδες σε οροσειρές όπως οι Δυναρίδες και τα Απέννινα και το υψηλό αλπικό καρστ που εκτείνεται στις κεντρικές Άλπεις και χαρακτηρίζεται από απότομες πλαγιές και ισχυρά πτυχωμένα πετρώματα. Το καρστ της Μεσογείου περιλαμβάνει ουσιαστικά όλες τις τυπικές μορφές καρστ (γλυφές, δολίνες, ξηρές κοιλάδες, ουβάλες, πόλγες, καρστικά πλατώ, φαράγγια και σπήλαια).
- Ανθρακικό καρστ σε περιβάλλον πλατφόρμας: Χαρακτηρίζεται από παχιά συστήματα ιζηματογενών πετρωμάτων και σε αντίθεση με το καρστ των γεωσυγκλίνων τα πετρώματα είναι λιγότερο πτυχωμένα. Οι τέσσερις τυπικές πλατφόρμες είναι :
- Ρωσική πλατφόρμα καρστ: Σχηματίζεται από το Προκάμβριο έως Νεογενές και περιλαμβάνει Παλαιοζωικά και Μειοκαινικά ιζήματα. Εκτείνεται στην ρωσική πεδιάδα ενώ καλύπτει επίσης και τα Ουράλια όρη.
- Yucatan καρστ: σχηματίστηκε σε τεταρτογενείς αποθέσεις και επηρεάστηκε από την διακύμανση του νερού της θάλασσας της Καραϊβικής, κατά το Πλειστόκαινο. Χαρακτηρίζονται από υπόγεια κανάλια και καταπτώσεις οροφών σπηλαιων τα οποία διαρρέονταν από νερό. Τέτοιας μορφής καρστ παρατηρείται στο Yucatan του Μεξικού.



- Υπόγειος υδροφορέας Edwards: Εκτείνεται σε μία πεδινή ζώνη 250 km στο νότιο-κεντρικό Τέξας. Πρόκειται για ένα από τα πιο ιδιαίτερα υπόγεια συστήματα και αρτεσιανά φαινόμενα. Οι ασβεστόλιθοι και οι δολομίτες της περιοχής έχουν μεγάλη πάχη, ενώ η λοφώδης-πεδινή περιοχή διαχωρίζεται από την παράκτια μέσω απότομων γκρεμών.
- Κρητις Κρητιδικού, η οποία παρατηρείται στην Μ.Βρετανία, την Γαλλία, την Δανία και την Γερμανία. Παρατηρούνται κυρίως κατά μήκος ακτογραμμών.
- Εβαπορίτες: παρατηρούνται σε ξηρά-ημίξηρα κλίματα. Οι χαμηλές βροχοπτώσεις και η απουσία ρεμάτων που οδήγησε στην απόθεση εβαποριτών.

Πίνακας 2.2: Κλάσεις ασβεστολίθου ανάλογα με τον βαθμό καρστικοποίησής του.

Κατηγορίες καρστ	Περιβάλλον	Καταβόθρες	Υπόβαθρο	Ρωγμές	Σπήλαια	Έρευνα εδάφους	Θεμελιώσεις
κI	Έρημοι, περσιπαγετώδη	Σπάνια	Σχεδόν ομοιόμορφο, ελάχιστες ρωγμές	Ελάχιστες και χαμηλή δευτερεύουσα περατότητα	Σπάνια και ελάχιστα	Συμβατική	Συμβατική
κII	Ελάχιστο σε εύκρατο κλίμα	Λίγες καταβόθρες καθίζησης ή κατάρρευσης συνεκτικών υλικών	Πολλές μικρές ρωγμές	Εκτεταμένες κοντά στην επιφάνεια	Πολλά μικρά σε μέγεθος <3m	Κυρίως συμβατική, με διατρήσεις ανίχνευσης για ρωγμές στο υπόβαθρο	Έλεγχος αποστράγγισης με μικρές ενεματωμένες ρωγμές
κIII	Εύκρατο κλίμα και ελάχιστο σε υγρά τροπικά	Καταβόθρες καθίζησης, κατάρρευσης και μεγάλες διάλυσης	Εκτεταμένες ρωγμές και ανάγλυφο <5m, Χαλαρά τεμάχια	Εκτεταμένες δευτερεύουσες ρωγμές	<5m και εκτεταμένα σε πολλά επίπεδα	Διατρήσεις ανίχνευσης 4m και μέθοδος μικροβαρύτητας	Πλάκες και δοκοί από τσιμέντο
κIX	Εύκρατο κλίμα τροπικό	Πολλές καταβόθρες διάλυσης και καθίζησης και παρουσία καλυμμένων καταβοθρών	Εκτεταμένες ρωγμές και ανάγλυφο 5-20m, Χαλαροί πυλώνες	Εκτεταμένες δευτερεύουσες ρωγμές	>5m	Διατρήσεις ανίχνευσης στο υπόβαθρο και στο πέτρωμα και μέθοδος μικροβαρύτητας	Πάσσαλοι σε έδαφος που έχει βελτιωθεί ή ενεμάτωση για τον έλεγχο αποστράγγισης
κX	Υγρά, τροπικά	Πολύ μεγάλες κατολισθήσεις όλων των τύπων και συμπίκνωση του εδάφους σε θέσεις καταβοθρών κατάρρευσης	Ανάγλυφο >20m, πολύ χαλαροί πυλώνες που έχουν καταρρεύσει μεταξύ των ρωγμών	Άφθονες και περίπλοκες κοιλότητες	Συστήματα σπηλαίων και θάλαμοι >15m	Έρευνα σε ατομικό επίπεδο για την τοποθέτηση κάθε πασσάλου	Πάσσαλοι σε έδαφος που έχει βελτιωθεί και τοποθέτησή τους είτε επάνω σε έντονες κορυφές ή σε σωρούς μεγάλου βάθους

Ένα επιπλέον από βασικό χαρακτηριστικό το οποίο οφείλεται εξίσου στο περιβάλλον εμφάνισης του ασβεστολίθου, είναι το επίπεδο καρστικοποίησης του. Έτσι ανάλογα με τον βαθμό τον οποίο έχει δεχθεί καρστική διάλυση ο ασβεστόλιθος διακρίνεται σε κλάσεις από νέο σε ώριμο έως υπερώριμο καρστικοποιημένο ασβεστόλιθο. Ο βαθμός καρστικοποίησης του πετρώματος είναι ιδιαίτερα σημαντικός για τον τρόπο τον οποίο αυτό θα αντιμετωπιστεί κατά την κατασκευή ενός έργου. Στον πίνακα 2.2

παρουσιάζονται με λεπτομέρεια οι κλάσεις του ασβεστολίθου ανάλογα με τον βαθμό που έχει καρστικοποιηθεί.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα καρστικοποίησης παρατηρήθηκε στην σήραγγα **Αποσελέμη**, η οποία διανοίχθηκε σε περιβάλλον ασβεστολίθων της σειράς Τρίπολης και Ιονίου, ενώ ενδιάμεσα βρίσκονταν και η φυλλιτική σειρά σε εναλλαγές με χαλαζίτες. Οι συνθήκες ήταν εξόχως περατές και οι βροχοπτώσεις κατείσδυναν μέσω των καταβοθρών σε παράκτιες περιοχές και σε πηγές. Τα καρστικά κενά που βρέθηκαν από τις γεωτρήσεις στην Ιόνιο ζώνη δεν είχαν μεγάλες διαστάσεις, ενώ στην επιφάνεια του εδάφους οι κοιλότητες δεν ξεπερνούσαν το ένα μέτρο. Ωστόσο οι ασβεστόλιθοι της Τρίπολης παρουσίαζαν μεγαλύτερο βαθμό καρστικοποίησης και η περίπτωση συνάντησης κενών μεγαλύτερων της κλίμακας της σήραγγας δεν αποκλείστηκε. Πράγματι ο εντοπισμός σπηλαιώσεων καθυστέρησε την πρόοδο των εργασιών. Οι διατρήσεις προπορείας αποτέλεσαν βασική μέθοδο για την έγκαιρη αναγνώριση της παρουσίας διάφορων καρστικών κενών.



Εικόνα 2.7: Η κεφαλή του TBM, όταν εντόπισε καρστικό σπήλαιο και σταμάτησε η λειτουργία του (Πηγή: Σήραγγες στην Ελλάδα, γεωλογία, σχεδιασμός, κατασκευή 2016)



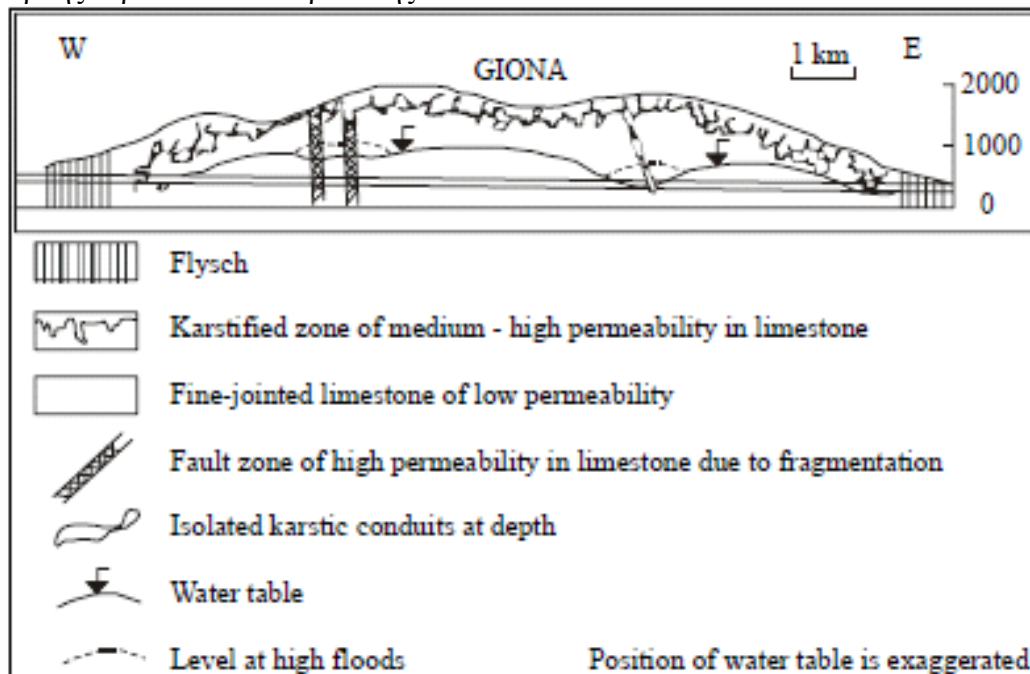
Εικόνα 2.8: Το εσωτερικό του καρστικού σπηλαίου της σήραγγας Αποσελέμη (Πηγή: Σήραγγες στην Ελλάδα, γεωλογία, σχεδιασμός, κατασκευή 2016)

Στην Βόρεια Ελλάδα κατασκευάστηκε η σήραγγα της **Δωδώνης** στο εσωτερικό στρωματώδους ασβεστολίθου, αργίλου και πηλού. Πρόκειται για μια περίπτωση ενεργούς καρστικής διάλυσης, η οποία προκάλεσε δύο σημαντικές καταρρεύσεις με την παρουσία καταβοθρών στην επιφάνεια. Τα κενά ήταν γεμάτα με αργιλικό υλικό, κομμάτια σπασμένου πετρώματος, ενώ εμφάνιζαν και υγρασία. Η αρχική κατάρρευση είχε διάμετρο 1,5 μέτρα στην σήραγγα και 3 μέτρα στην επιφάνεια, οδηγώντας στην πτώση 1200m³ υλικού στο εσωτερικό της σήραγγας



Εικόνα 2.9: Το καρστικό κενό το οποίο «άδειασε» στο εσωτερικό της σήραγγας. (Πηγή: Σήραγγες στην Ελλάδα, γεωλογία, σχεδιασμός, κατασκευή 2016)

Τέλος, η σήραγγα Γκιώνας διαπέρασε έναν ασβεστόλιθο που είναι επιφανειακά καρστικοποιημένος, ενώ στα εσωτερικά τμήματα παρατηρείται καρστικοποιημένος κυρίως σε θέσεις ρηγμάτων, με αποτέλεσμα να μην αποκλείεται η πιθανότητα εισροής νερού στο εσωτερικό της



Σχήμα 2.4: Η σήραγγα Γκιώνας και οι καρστικοποίηση κατά μήκος της.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΡΣΤΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ ΣΕ ΜΙΑ ΠΙΘΑΝΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ.

Οι καρστικοί σχηματισμοί αποτελούν τις πιο δύσκολες εδαφικές συνθήκες για την κατασκευή ενός έργου. Συμβατικές μέθοδοι όπως: τοπογραφικοί και γεωλογικοί χάρτες, αεροφωτογραφίες, χάρτες καταβοθρών, υδρογεωλογικές αναφορές και πληροφορίες από δοκιμαστικές διατρήσεις, είναι αρκετά χρήσιμες, αλλά όχι αρκετές.

Αυτές οι πληροφορίες πρέπει να χρησιμοποιηθούν ως ένδειξη ύπαρξης σπηλαίων, καταβοθρών και εξαφανισμένων ποταμών, διακλάσεων, της ποιότητας του βράχου, του βάθους του υπερκείμενου και των αποδόσεων των πηγών, οι οποίες μπορεί να προμηνύουν τον βαθμό της διάλυσης ή διάσπασης του πετρώματος. Η έρευνα πρέπει να συνδυάζεται με αναγνώριση στο πεδίο, η οποία θα εξακριβώνει τις προηγούμενες πληροφορίες από την έρευνα γραφείου.

3.1 ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ

Η έρευνα που ακολουθείται για την επιτυχημένη κατασκευή μιας σήραγγας βασίζεται στην εκτίμηση πολλών παραμέτρων. Ως πρωταρχικό στάδιο, απαιτείται η γεωλογική χαρτογράφηση της περιοχής για την σωστή εκτίμηση των συνθηκών του εδάφους κατασκευής του υπόγειου έργου. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται ο σχεδιασμός ενός γεωλογικού προσομοιώματος, με βάση τις γεωλογικές συνθήκες, την ποιότητα του εδάφους κατασκευής και τους πιθανούς κινδύνους που μπορεί να συναντήσει το έργο. Η διαμόρφωση του γεωλογικού προσομοιώματος βασίζεται στην κατανόηση της γεωλογίας της ευρύτερης περιοχής. Οι συνιστώσες του είναι οι γενετικές διεργασίες, οι επιγενετικές, η τεκτονική εξέλιξη της περιοχής, η παλαιογεωγραφία της, το γεωδυναμικό της περιβάλλον και οι υδρογεωλογικές συνθήκες.

Η γεωλογική χαρτογράφηση ενός περιβάλλοντος που παρουσιάζει καρστικές μορφές χωρίζεται σε τρία τμήματα. Την ευρύτερη χαρτογράφηση της περιοχής, την

χαρτογράφηση των επιφανειακών καρστικών μορφών και τέλος των υπόγειων καρστικών μορφών που στην περίπτωση της σήραγγας είναι οι σημαντικότερες.

3.2 ΙΧΝΗΘΕΤΗΣΕΙΣ

Στα ανθρακικά πετρώματα που έχουν υποστεί καρστική διάλυση, το νερό διέρχεται στις ζώνες διάρρηξης και ακολουθεί τις κλίσεις τους, κατεισδύοντας σε βάθος και δημιουργώντας καρστικές πηγές. Επομένως η υδρολογία και η τεκτονική της περιοχής επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την κίνηση του υπόγειου νερού.

Η ιχνηθέτηση είναι η μέθοδος που μελετά την κίνηση του νερού μέσα στους καρστικούς σχηματισμούς. Διακρίνεται σε ποιοτική όταν μελετά την είσοδο και έξοδο του νερού στον υπόγειο καρστικό υδροφορέα και ως ποσοτική όταν μελετά τις ποσοτικές αναλογίες του εισερχόμενου και εξερχόμενου νερού. Ως σημεία εισόδου μπορούν να θεωρηθούν καταβόθρες ή θέσεις που επιτρέπουν την κατείσδυση νερού, ενώ ως σημεία εξόδου οι καρστικές πηγές. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην χρήση ιχνηθετών, όπως ισότοπα και μολυντές, χημικές ενώσεις αλάτων (NaCl) και χημικά στοιχεία (Mn , Br), ραδιενεργούς ιχνηθέτες (^3H) και φθορίζουσες ουσίες (ουρανίνη).

3.3 ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Με την χρήση των μεθόδων της γεωφυσικής μπορούμε να αντλήσουμε πληροφορίες για το υπέδαφος, πριν αρχίσουμε την εκσκαφή, χωρίς να διαταράξουμε καθόλου την μάζα του πετρώματος που μελετούμε. Στην περίπτωση λοιπόν που πρόκειται για καρστικούς σχηματισμούς, μπορούμε να προβλέψουμε πιθανά σημεία εμφάνισης καρστικών έγκοιλων, την έκταση και την γεωμετρία τους. Η κάθε μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτόνομα, ωστόσο για μεγαλύτερη ακρίβεια στην κατασκευή των μοντέλων του υπεδάφους προτείνεται η χρήση δύο τουλάχιστον μεθόδων από αυτές.

Συγκεκριμένα οι μέθοδοι είναι οι εξής:

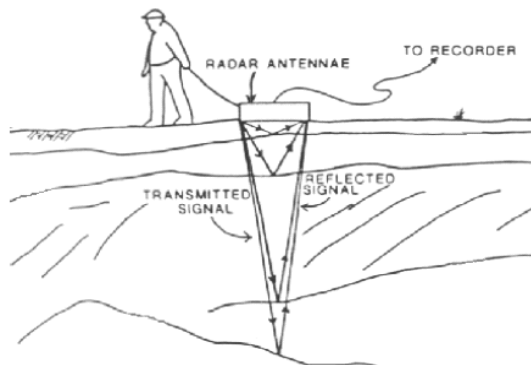


Figure 5. Ground Penetrating Radar (NJGWS, 2012).

Σχήμα 3.1: Μέθοδος γεωραντάρ. (Πηγή: NJSGWS, 2012)

Γεωφυσικές

- *Γεωραντάρ (GPR ή Ground penetrating system)* : Πρόκειται για την πιο γνωστή γεωφυσική μέθοδο εντοπισμού καρστ. Το γεωραντάρ μπορεί να δώσει στους μηχανικούς μια βασική εικόνα των στρωμάτων που βρίσκονται σε μικρά βάθη κάτω από το έδαφος. Χρησιμοποιείται καλύτερα σε επίπεδες επιφάνειες με καλοσχηματισμένα κοκκώδη εδάφη. Βασίζεται στην εκπομπή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από τον πομπό μιας κεραίας, τα οποία ακολουθούν μια διαδρομή και ανακλώνται στα όρια των σχηματισμών του υπεδάφους και επιστρέφουν στον δέκτη της κεραίας όπου και καταγράφονται. Η γρήγορη συλλογή πληροφοριών για το υπέδαφος σε συνδυασμό με την ανάλυση υψηλής ποιότητας και ακρίβειας του βάθους ανωμαλίας των σχηματισμών καθιστούν αυτή την μέθοδο ως την βασική για την εύρεση καρστικών κενών και υπόγειων έγκοιлов.
- *Μέθοδος απεικόνισης της ηλεκτρικής αντίστασης (electrical resistivity imaging)*: Είναι μια από τις πιο διαδεδομένες και χρήσιμες μεθόδους εντοπισμού καρστικών σχηματισμών. Η μέθοδος αυτή είναι προτιμότερο να χρησιμοποιείται όταν τα στρώματα του εδάφους αποτελούνται από υψηλής αγωγιμότητας αργίλους, όπου τα γεωραντάρ δεν είναι αποτελεσματικά. Λόγω της μεγάλης αντίθεσης στις αγωγιμότητες μεταξύ αέρα και εδάφους, η μέθοδος αυτή μπορεί να ανιχνεύει κενά αέρος στο έδαφος, πριν ακόμα σχηματιστεί ολοκληρωτικά ένα καρστικό έγκοιλο (π.χ καταβόθρα). Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί ηλεκτρόδια για να μετρήσει την ηλεκτρική αγωγιμότητα

του εδάφους σε διαφορετικά βάθη. Τα διαφορετικά στρώματα εμφανίζουν διαφορετικές αγωγιμότητες, γεγονός που επιτρέπει στους ειδικούς να κατασκευάσουν ένα προφίλ με τα είδη των εδαφών σε σύγκριση με το βάθος.

- *Μέθοδος "μικροβαρύτητας" (Microgravity Syrveying):* Χρησιμοποιείται για την εύρεση καρστικών σχηματισμών σε αστικοποιημένες περιοχές όπου τα περιθώρια θορύβου ή οι υπάρχουσες υποδομές δεν επιτρέπουν την απεικόνιση της αντίστασης ή την χρήση σεισμικών μεθόδων. Επειδή τα κενά στο έδαφος έχουν πολύ χαμηλότερες πυκνότητες απ'ότι τα περιβάλλοντα στρώματα, οι συσκευές μικροβαρύτητας είναι ικανές να ανιχνεύσουν τις μικρές αλλαγές βαρυτικής έλξης της γης σε αυτές τις περιοχές. Ακριβώς επειδή οι αλλαγές στην βαρύτητα είναι πολύ μικρές, απαιτείται η υψηλής ευαισθησίας εξοπλισμός για την έρευνα και μέθοδοι ανάλυσης που καθορίζουν με ακρίβεια τι προκαλεί την αρνητική βαρυτική ανωμαλία. Η τομογραφία αντίστασης σε συνδυασμό με την μέθοδο μικροβαρύτητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αναγνώριση του είδους του πετρώματος και την διάκριση των καταβόθρων από τα σπήλαια, ωστόσο παραμένει ένας ακριβός συνδυασμός μεθόδων.

Ένα παράδειγμα της χρήσης μικροβαρύτητας είναι αυτό της ανάπτυξης μια επιχείρησης ενός πάρκου στο **νότιο Kentucky**, όπου στόχευε στην εύρεση καρστικών σχηματισμών. Επειδή η περιοχή έρευνας ήταν πολλή μεγάλη, η ανάλυση με γεώτρηση δεν ήταν ικανοποιητική ούτε σε χρόνο ούτε σε κόστος. Γι αυτό τον λόγο οι μηχανικοί χρησιμοποίησαν την μέθοδο μικροβαρύτητας για μία έκταση περίπου $3,6 \text{ km}^2$. Εντοπίστηκαν πολλές αρνητικές βαρυτικές ανωμαλίες, οι οποίες με περαιτέρω έρευνα γεωτρήσεων αποδόθηκαν σε μαλακά, υγρά και χαλαρά εδαφικά υλικά που αποτελούν πιθανή περιοχή καταβόθρας. Η κορυφή στην βαρύτητα οφείλεται στα υψηλής πυκνότητας υλικά όπως είναι το συμπίεσμένο χαλίκι. Αυτές οι καταγραφές των μηχανικών οδήγησαν στην κατασκευή ενός πλάνου για την περιοχή που θα τοποθετηθεί η κάθε γεώτρηση, αντί για την τοποθέτηση γεωτρήσεων σε όλη την περιοχή κατασκευής του έργου.

- *BEAM(Bore-Tunnelling Electrical Ahead Monitoring):* Βασίζεται στην μέθοδο επαγόμενης πόλωσης, χρησιμοποιώντας την κεφαλή του TBM, ως

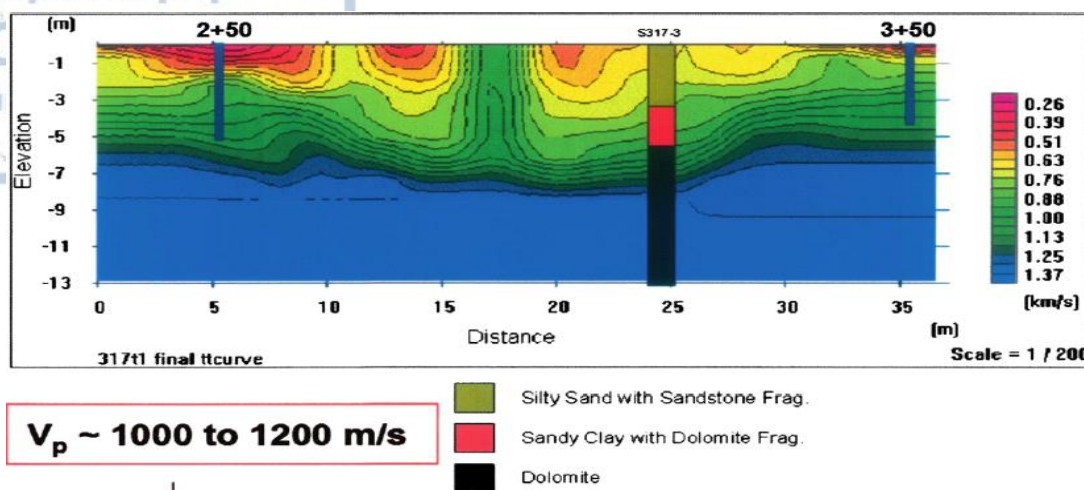


ηλεκτρόδιο και επιτρέποντας την εύρεση διακλάσεων και κενών στην βραχώδη μάζα.

Οι έρευνες της ηλεκτρικής αντίστασης των σχηματισμών έχουν αποδείξει ότι είναι καταλληλότερες για τον εντοπισμό καρστικών κενών απ' ότι οι ηλεκτρομαγνητικές έρευνες. Παρόλα αυτά η εγκυρότητά τους είναι μέτρια έως φτωχή σε περιοχές με ακανόνιστες επιφάνειες εδάφους ή πετρώματος.

- Σεισμικές έρευνες (seismic surveys): Οι χρήσεις τους είναι πολλές, ειδικά για τον σχεδιασμό βαθιών θεμελιώσεων, όπως γεφυρών. Βασίζονται στην διάδοση και στην φασματική ανάλυση των ελαστικών κυμάτων. Οι πιο γνωστές σεισμικές μέθοδοι είναι οι : TSP 203 (Tunnel Seismic Prediction) και η TRT (Tunnel Reflection Tomography). Οι μέθοδοι αυτές επιτρέπουν την έρευνα της ποιότητας του πετρώματος και της παρουσίας ρηγμάτων. Μέχρι στιγμής οι σεισμικές μέθοδοι είναι καταλληλότερες για τον εντοπισμό των διεπιφανειών των στρωμάτων και του υποβάθρου. Σπανιότερα μπορούν να εντοπίσουν καρστικές κοιλότητες σε επιφάνειες υπερκείμενες από την επιφάνεια του εδάφους, ενώ μπορούν να εντοπίσουν κοιλότητες στο υπόβαθρο.

Οι γεωφυσικές και σεισμικές μέθοδοι πλεονεκτούν στο γεγονός ότι δεν διαταράσσουν το πέτρωμα και είναι σχετικά οικονομικές σε σύγκριση με την εφαρμογή άλλων διατρήσεων. Η εφαρμογή τους ωστόσο μπορεί να εντοπίσει σημεία κατάλληλα για την τοποθέτηση διατρήσεων ανίχνευσης, οι οποίες είναι απαραίτητες για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων των γεωφυσικών ερευνών.



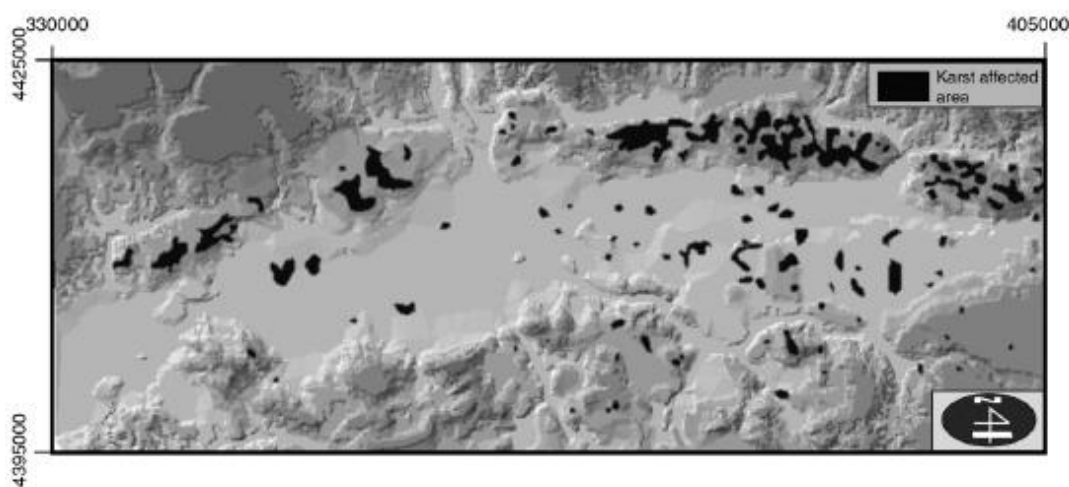
Σχήμα 3.1: Το μοντέλο απεικόνισης των στρωμάτων του εδάφους που προέκυψε από τις ταχύτητες διάδοσης των σεισμικών κυμάτων. Ο οριζόντιος άξονας απεικονίζει την κατά μήκος απόσταση της τομογραφίας, ενώ ο κάθετος τα βάθη των μετρήσεων. (Hiltunen and Cramer, 2008)

3.4 ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ ΑΕΡΟΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ

Με την χρήση αεροφωτογραφιών και το σύστημα GIS προσφέρεται μια πληθώρα εργαλείων και δυνατοτήτων που χρησιμοποιούνται στην διαχείριση, ανάλυση και απεικόνιση σπηλαίων και καρστικών σχηματισμών, αυξάνοντας την γνώση γι' αυτά και βοηθώντας στην καλύτερη αντιμετώπισή τους. Συγκεκριμένα, το GIS χρησιμοποιείται αρχικά σαν μέσο καταγραφής των δεδομένων που συλλέγονται από το πεδίο, εξίσου στην επιφάνεια της γης και υπόγεια και είναι σημαντικό για την συλλογή και αφομοίωση ενός μεγάλου πλήθους δεδομένων. Επιπλέον, οι δυνατότητες χαρτογράφησης και δημοσίευσης επιτρέπουν τους χρήστες να κατασκευάσουν υψηλής ευκρίνειας χάρτες και να διαδίδουν πληροφορίες σε πολλές διαφορετικές μορφές. Ακόμη, οι δυνατότητες απεικόνισης σε σύστημα τριών διαστάσεων προσφέρουν μοναδικούς τρόπους απεικόνισης σπηλαίων και καρστικών σχηματισμών. Η εξέταση του χώρου και τα εργαλεία για την διαχείριση των δεδομένων διευκολύνουν την αποθήκευση και ανάκτηση των πληροφοριών. Τέλος η χωρική ανάλυση και η χρήση μοντέλων συμβάλλουν στην κατανόηση διάφορων διατάξεων και των σχέσεών τους με το περιβάλλον.

Ένα παράδειγμα χρήσης του συστήματος GIS και της αεροφωτογραφίας είναι αυτό της **λεκάνης Σίβας στην Τουρκία**. Η απεικόνιση των τεχνικών γεωλογικών δεδομένων σε έναν χάρτη επικινδυνότητας της περιοχής είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για τον σχεδιασμό ενός έργου που συναντά καρστικό περιβάλλον. Στην περίπτωση αυτής της λεκάνης, η γύψος κάλυπτε ένα μεγάλο μέρος της και ήταν καρστικοποιημένη σχηματίζοντας καταβόθρες, δολίνες και άλλες μορφές κατάπτωσης. Σκοπός αυτής της έρευνας ήταν η έρευνα των πιθανών περιοχών που μπορεί να καταρρεύσουν στην λεκάνη στο μέλλον χρησιμοποιώντας το παγκόσμιο γεωγραφικό σύστημα.

Στην περιοχή παρατηρήθηκαν οχτώ διαφορετικοί γεωλογικοί σχηματισμοί. Τεταρτογενή αλλούβια, τραβερτίνης, κροκαλοπαγή, ψαμμίτης, σχιστόλιθος κάτω Μειοκάνιου, Ολιγοκαινικά κροκαλοπαγή και ιλυόλιθοι μαζί με γύψο, Ηωκαινικοί ανδεσίτες, ψαμμίτες και τέλος μεταμορφωμένα πετρώματα ηλικίας Παλαιοζωικού. Η γύψος κάλυπτε μια πολλή μεγάλη έκταση πάχους σε ορισμένα σημεία 100-200 μέτρα, αποτελούμενη από δολίνες.



Εικόνα 3.1: Κατανομή της καρστικοποιημένης έκτασης στην λεκάνη Σίβας της Τουρκίας. (Yilmaz 2007)

Συλλέγοντας δεδομένα καταπτώσεων, λιθολογίας, συστήματος αποστράγγισης, τεκτονικών δομών, μορφολογίας, πηγών και βλάστησης περιοχής σε συνδυασμό με την χρήση αεροφωτογραφιών και δορυφορικών εικόνων τα δεδομένα ψηφιοποιήθηκαν. Χρησιμοποιώντας την μέθοδο αναλογίας συχνότητας η χωρική

σχέση μεταξύ της καρστικοποιημένης περιοχής και του κάθε παράγοντα κατάρρευσης αναλύθηκε και οδήγησε στην κατασκευή ενός χάρτη επικινδυνότητας της περιοχής.

Παρόλα αυτά η μέθοδος του GIS βασίζεται κυρίως στην ψηφιακή απεικόνιση χαμηλής ανάλυσης τοπογραφικών χαρτών και αεροφωτογραφιών μετά από έρευνα στο πεδίο, γεγονός που απαιτεί περισσότερο χρόνο. Επιπλέον η ολοκλήρωση της έρευνας στο πεδίο για κάθε καταβόθρα είναι συχνά αδύνατη, επομένως μπορεί τα δεδομένα να μην είναι εντελώς αντιπροσωπευτικά. Τέλος, μερικές έρευνες έδειξαν ότι οι καταβόθρες μπορεί να αλλάζουν πολύ γρήγορα λόγω φυσικών και ανθρωπογενών παραμέτρων όπως η αστικοποίηση και η αγροτική εξάπλωση.

Επομένως κρίθηκε απαραίτητη η ανάπτυξη ενός αυτόματου συστήματος χαρτογράφησης των καταβόθρων και γενικά καρστικών σχηματισμών. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην τεχνολογία του LIDAR και InSAR με την οποία επιτυγχάνεται η λεπτομερής απεικόνιση και ανάλυση μικρής έως μεγάλης κλίμακας γεωμορφολογικών σχηματισμών και επομένως και καρστικών μορφών.

3.5 ΔΙΑΤΡΗΣΕΙΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ

Η αξιοπιστία τέτοιων μεθόδων βασίζεται στον εντοπισμό υπόγειων κενών και εξαρτάται από τον αριθμό των διατρήσεων και τις διαστάσεις των κενών. Εάν κάθε διάτρηση φτάσει το υπόβαθρο τότε η πιθανότητα εύρεσης ενός καρστικού κενού υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο του Beacher, et all, 1980, (in Thomas and Roth 1999) :

$$Pr = 1 - (1 - Aa/As)n, \text{ όπου}$$

Pr = η πιθανότητα εντοπισμού καρστικού κενού.

n = ο αριθμός των διατρήσεων, ομοιόμορφα κατανεμημένων στην περιοχή

Aa = οριζόντια διατομή του ίδιου του κενού

Έχει υπολογιστεί ότι η πυκνότητα 2,500 διατρήσεων ανά 10 km² είναι απαραίτητη για να υπάρχει 90% πιθανότητα εντοπισμού κενού 2,5 μέτρων διαμέτρου. Το βάθος της διάτρησης είναι συνάρτηση του μεγέθους του κενού και του βάθους του.

Στις σήραγγες στο εσωτερικό καρστικοποιημένων πετρωμάτων, οι διατρήσεις ανίχνευσης είναι απαραίτητες. 3-5 γεωτρήσεις, βάθους 10-12 μέτρων, πρέπει να γίνουν στο εσωτερικό του πετρώματος, από το μέτωπο της σήραγγας, εκ των προτέρων, για τον εντοπισμό καρστικών κενών ή παρουσίας υδάτων (Marinos 2001, in Beck et all, 2001) .

3.6 ΜΕΛΕΤΗ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Οι ασβεστόλιθοι και γενικά τα ανθρακικά πετρώματα παρουσιάζουν καλή γεωτεχνική συμπεριφορά. Ωστόσο όταν αυτά έχουν υποστεί καρστική διάλυση, τότε μπορεί να προκαλέσουν μεγάλο κίνδυνο κατά την διάρκεια διάνοιξης μιας σήραγγας. Η βασική πηγή του προβλήματος είναι τα υπόγεια νερά και ακολούθως τα συστήματα διακένων και κοιλοτήτων, τα οποία μπορεί να είναι κενά, πληρωμένα με νερό ή υλικό. Προκειμένου λοιπόν να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα για την αντιμετώπιση και πρόληψη τέτοιων προβλημάτων απαιτείται η κατάλληλη μελέτη της υδρογεωλογίας της περιοχής

Κατά το πρώτο στάδιο έρευνας ενός ασβεστολίθου είναι απαραίτητο να γίνει κατανοητό το καρστικό μοτίβο που εκτείνεται γύρω από το περιβάλλον της σήραγγας, σε σχέση με την υδρογεωλογία. Αυτή η υδρογεωλογική έρευνα πρέπει να περιλαμβάνει την παλαιογεωγραφική εξέλιξη της περιοχής και τον οριζόντιων κινήσεων και αλλαγών του γεωγραφικού επιπέδου βάσης το οποίο σχετίζεται με τις παλιές θέσεις πηγών. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να γίνει γνωστό το βάθος της καρστικοποίησης μέσα στον ασβεστόλιθο ενός βουνού και η γεωμετρία του καρστικού επιπέδου βάσης. Ωστόσο αυτό το επίπεδο δεν περιορίζεται απαραίτητα στο τωρινό υψόμετρο των πηγών. Επομένως είναι απαραίτητη η γεωλογική έρευνα σε μια ευρύτερη περιοχή.

Με την μέθοδο των ιχνηθετήσεων μπορούμε να προσδιορίσουμε την διαδρομή που ακολουθούν τα δίκτυα των καρστικών κενών. Μια πιο λεπτομερής ανάλυση της υδρογεωλογικής λεκάνης θα προσδιορίσει τις ζώνες πολύ υψηλής περατοτητας (π.χ

ζώνες ρηγμάτων). Οι θέση των επιπέδων του υπόγειου νερού και οι διακυμάνσεις τους σύμφωνα με τις γεωτρήσεις στην περιοχή απεικονίζουν την μεταβιβαστικότητα και την αποστραγγιστικότητα στο σύνολο της καρστικής μάζας, όχι όμως ξεχωριστά για κάθε καρστικό αγωγό.

Στην περίπτωση της κατασκευής σήραγγας κοντά στην επιφάνεια ή σε αστικοποιημένη περιοχή η εφαρμογή δοκιμών άντλησης, πιεζομετρίας και μετρήσεων περατότητας είναι μέθοδοι που θα έδιναν πληροφορίες για την στάθμη του υδροφορέα. Σε περίπτωση που πρόκειται ωστόσο για σήραγγες σε μεγαλύτερα βάθη (περιοχές βουνών) η έρευνα είναι πιο περιορισμένη λόγω του υψηλού κόστους και η εφαρμογή δοκιμαστικών αντλήσεων είναι εξίσου περιορισμένη. Κρίνεται λοιπόν απαραίτητη η γνώση του γεωλογικού και υδρογεωλογικού μοντέλου που θα παρέχει τις κατάλληλες πληροφορίες για τις συνθήκες που θα παρουσιαστούν. Επομένως σε αυτές τις περιοχές η έρευνα βασίζεται σε υδρογεωλογικές μελέτες, ενώ καλύπτει την πιο ευρύτερη περιοχή του έργου προκειμένου να γίνουν γνωστά όλα τα δεδομένα και οι γεωλογικές συνθήκες που θα συναντήσει η σήραγγα. Η διαδικασία αυτή πρέπει να περιλαμβάνει:

- την αναγνώριση και ταξινόμηση του υδροφόρου ορίζοντα (λιθολογική και δομική χαρτογράφηση)
- τον καθορισμό των υδρογεωλογικών λεκανών και των περιοχών αποστράγγισης
- την περιγραφή των αποθεμάτων νερού
- την μελέτη των πηγών: τοποθεσία, ροή, ποσοστά εκφόρτισης
- συνδυασμό των πιεζομετρικών χαρτών
- εκτίμηση των υδραυλικών παραμέτρων τόσο τοπικά της σήραγγας όσο και στην ευρύτερη λεκάνη(περατότητα, μεταβιβαστικότητα, αποθηκευτικότητα)
- συμπεράσματα σε μορφή αναφοράς για τα υδρογεωλογικά και γεωμετρικά όρια για κάθε υδροφορέα και εκτίμηση των εισροών που σχετίζονται με την υπόγεια κατασκευή.

Οποιαδήποτε μεγάλη καταβόθρα πάνω από την σήραγγα είναι μία πιθανή περιοχή κατείσδυσης του νερού κατά την διάρκεια μεγάλων βροχοπτώσεων. Σε αυτή την περίπτωση, ακόμη και αν η σήραγγα είναι σχεδιασμένη αρκετά ψηλότερα από το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα, υπάρχει η πιθανότητα ξαφνικής εισροής νερού από την επιφάνεια. Ιδιαίτερα προβλήματα μπορεί να παρουσιαστούν κατά την εκσκαφή της σήραγγας κάτω από το επίπεδο του υδροφόρου. Σε αυτή την περίπτωση όλα τα καρστικά κανάλια μπορεί να δέχονται υψηλές πιέσεις και μεγάλες ποσότητες νερού που ρέουν με τυρβώδη ροή και μπορούν να αποβούν καταστροφικές για το έργο. Χωρίς την πιθανότητα αποστράγγισης της σήραγγας με την βαρύτητα, οποιαδήποτε εισχώρηση υπόγειου νερού περισσότερη από 100 l/s αποτελεί ένα μεγάλο πρόβλημα.

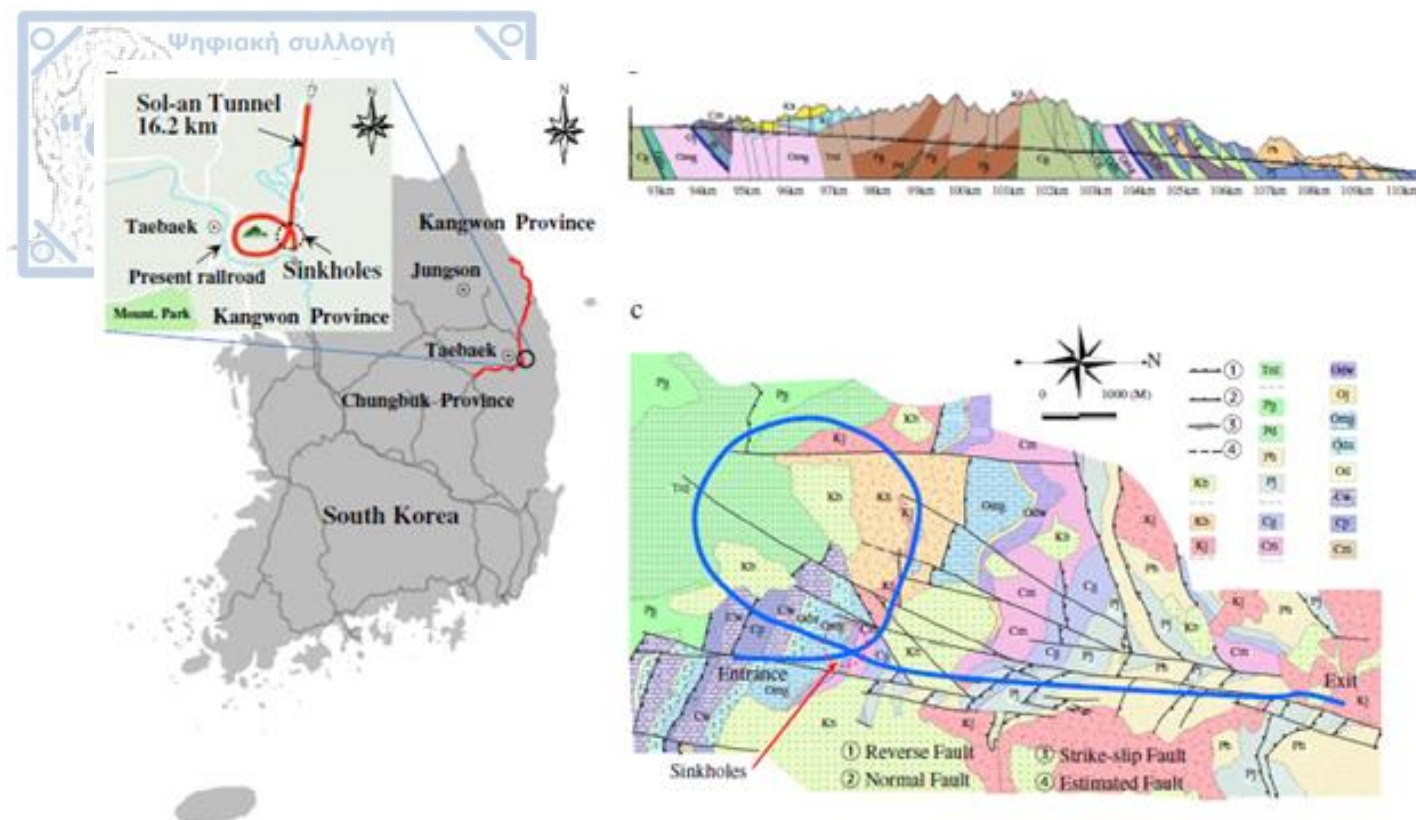
Επομένως τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά του καρστικού περιβάλλοντος απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή, αφού υπάρχει αυξημένος κίνδυνος εισροών νερού και περιβαλλοντικών προβλημάτων. Κάποιοι παράγοντες που μπορούν να ληφθούν υπόψη για την κατασκευή σήραγγας σε ασβεστόλιθο και γενικά σε ανθρακικό πέτρωμα είναι:

- ο υψηλός συντελεστής διείσδυσης μετεωρικού νερού
- η υψηλή περατότητα, συχνά σε μη γραμμική ροή νερού
- η προστασία από υψηλές τιμές περατότητας σε μεγαλύτερα βάθη
- η δυνατότητα ανάπτυξης μεγάλων υδρογεωλογικών λεκανών οι οποίες μπορεί να εκτείνονται πέρα από τα όρια της περιοχής μελέτης, γεγονός που οδηγεί σε μεγαλύτερες ποσότητες υπόγειου νερού.
- η ανάπτυξη ενός ετερογενούς δικτύου ροής, που βασίζεται στην τεκτονική και παλαιογεωγραφία της περιοχής με σκοπό την μεταφορά νερού και εκφόρτισή του πέρα από τα διασπασμένα και ρωγμωμένα πετρώματα μικρής έως μετριας περατότητας.
- η δυνατότητα υπόγειων έγκοιλων πληρωμένων με υλικά να συγκρατήσουν υπόγειο νερό.

Η κατασκευή της μεγαλύτερου μήκους σήραγγας *Σολ-Αν στην Νοτιοδυτική Κορέα*

Κατά την διάρκεια διάνοιξης της παρατηρήθηκε είσοδος νερού και καταρρεύσεις της υποστήριξης της συνοδευόμενες από την παρουσία καταβόθρων και καθιζήσεων του εδάφους. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο ασβεστόλιθος της περιοχής αποτελείται από μεγάλα ποσοστά καθαρού ασβεστίου, γεγονός που τον καθιστά πιο διαβρώσιμο. Το γεγονός αυτό είχε ως αποτέλεσμα την δημιουργία κοιλοτήτων μικρής κλίμακας επάνω στις ζώνες ρηγμάτων και στις ασυνέχειες, λόγω της αποσάθρωσης και της χημικής διάβρωσης. Με έρευνες διαπιστώθηκε ότι αυτά τα μικρά συστήματα χρησιμοποιούνταν ως αγωγοί που μετέφεραν αποθηκευμένο νερό από την επιφάνεια στην υπόγεια ζώνη της σήραγγας. Επιπλέον με μεθόδους γεωφυσικές και οριζόντιες διατρήσεις βρέθηκαν επιπλέον συστήματα καρστικών αγωγών.

Συγκεκριμένα ο ασβεστόλιθος της επαρχίας Γκάνγκουον-ντο στην Νοτιοδυτική Κορέα είναι ένας από τους πιο σημαντικούς φυσικούς πόρους της τσιμεντοβιομηχανίας της Κορέας, διότι αποτελείται από τεράστια αποθέματα και διαθέτει υψηλό ποσοστό καθαρού ασβεστίου. Η διπλή σήραγγα Σολ-Αν της περιοχής έχει μήκος 16.2 χμ και η βασική της κατασκευή βασίστηκε σε μεθόδους εκρηκτικών. Η είσοδος της τοποθετήθηκε 400μ ψηλότερα από την έξοδό της. Για να αντιμετωπιστεί αυτή η διαφορά η σήραγγα κατασκευάστηκε με ένα κυκλικό ελιγμό όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3. Στο πάνω τμήμα παρατηρείται ένα ρηχό αλλουβιακό στρώμα που αποτελείται από άμμο και χαλίκι που επικάθεται σε ένα στρώμα αποτελούμενο από βασάλτη, ανδεσίτη, κροκαλοπαγές, ψαμμίτη, ιλυόλιθο και τόφφους κρητιδικής περιόδου. Οι ζώνες Κρητιδικής περιόδου καλύπτονται από ψαμμίτες και σχιστολίθους Περμίου-Λιθανθρακοφόρου, οι οποίοι με της σειρά τους καλύπτονται από τεράστιους ασβεστολίθους Καμβρίου-Ορδοβίσιου. Ακόμη η περιοχή χαρακτηρίζεται από ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης και κανονικά.



Εικόνα 3.2: 1: Χάρτης τοποθεσίας της σήραγγας και παρουσίας καταβοθρών

2: Γεωλογικό μοντέλο της σήραγγας

3: Γεωλογικός χάρτης και απεικόνιση του ελιγμού της σήραγγας

(K.I Song et al . 2012)

Σύμφωνα με την αρχική έρευνα η περιοχή αποτελούνταν από περίπλοκα ιζηματογενή πετρώματα σύστασης ανθρακικής και σχιστολιθικής τα οποία προκαλούσαν συχνά τοπικές αστοχίες. Η κατώτερη έξοδος της σήραγγας αποτελείται από στρώματα ψαμμίτη, σχιστόλιθου, άνθρακα, ενώ η ανώτερη έξοδος βρίσκεται στο εσωτερικό του ασβεστόλιθου. Ο ελιγμός της σήραγγας είναι σχεδιασμένος στον ασβεστόλιθο ηλικίας Ορδοβίσσιου που περιέχει πολλές σπηλιές. Η κεντρική σήραγγα περιέχεται και αυτή στον ίδιο ασβεστόλιθο που όπως αναφέρθηκε χαρακτηρίζεται από υψηλά ποσοστά ασβεστίου. Παρόλα αυτά επιφάνειες καρστ, όπως δολίνες και καταβόθρες δεν είχαν γίνει αντιληπτές πριν την κατασκευή της σήραγγας. Τον Απρίλιο του 2006, νερά με καφέ αργίλους διείσδυσαν στο εσωτερικό της (Εικόνα 3.3) συνοδευόμενες από την ανάπτυξη καταβοθρών και καθιζήσεων του εδάφους (Εικόνα 3.2, Αρ.3: κόκκινη περιοχή). Λόγω της εισροής του νερού και της καφέ αργίλου στα πλευρικά τείχη της σήραγγας, στο δυτικό μέτωπο της σήραγγας αναπτύχθηκε μια καταβόθρα με το περιβάλλον νερό να αποστραγγίζεται σε αυτήν. Δύο βδομάδες αργότερα από την

παρουσία της πρώτης καταβόθρας παρατηρήθηκε η ανάπτυξη και άλλων καταβοθρών και καθιζήσεων δίπλα στο ρεύμα νερού με την κατάρρευση του σκυροδέματος. Η υψηλή πίεση του νερού που διέρχονταν από τις κοιλότητες του ασβεστόλιθου προκάλεσε σοβαρά προβλήματα στο εκτοξευμένο σκυρόδεμα και γενικά σε ολόκληρη την ευστάθεια της σήραγγας.

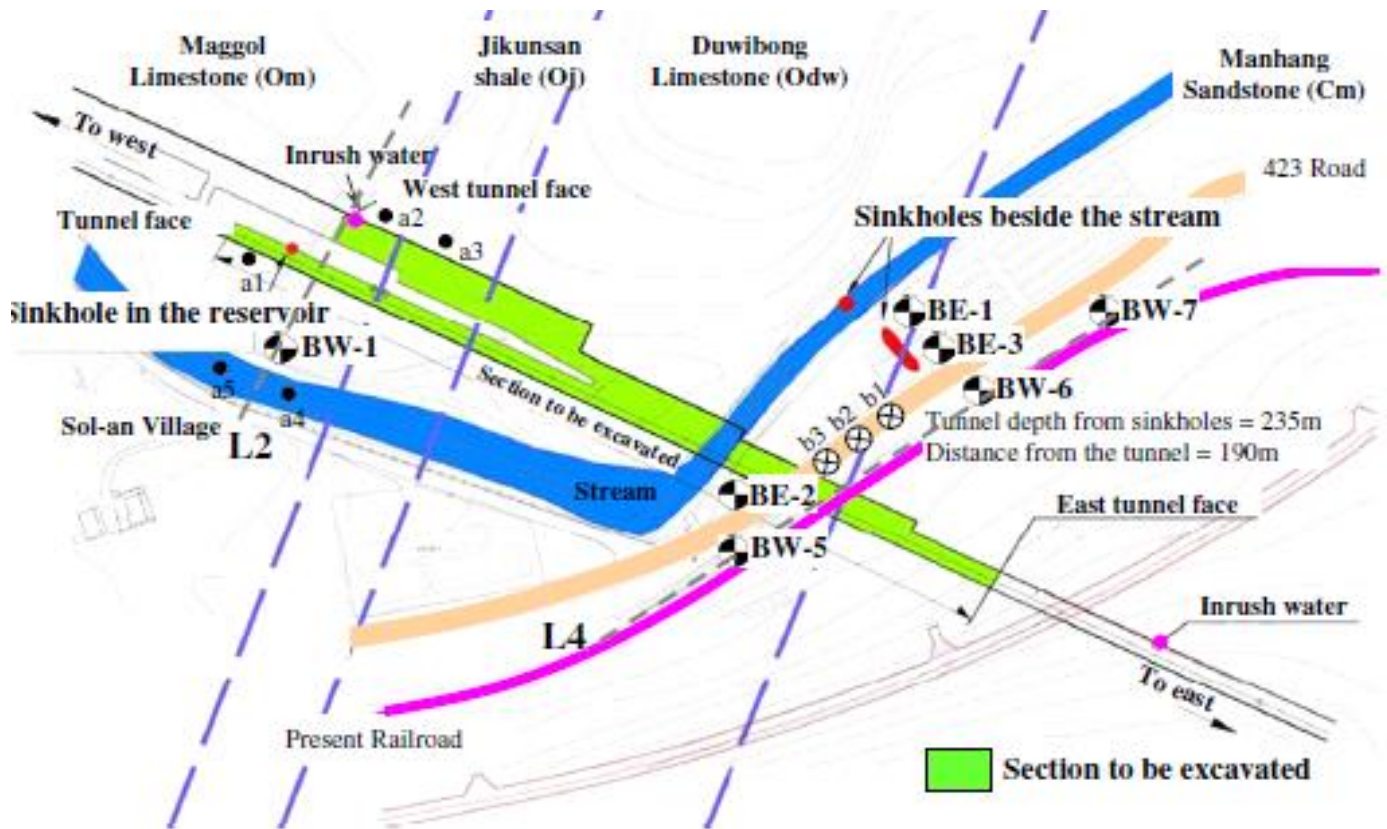


Fig. 2. The detailed view of sinkhole occurrence during construction.

Εικόνα 3.3: Πιο λεπτομερής εικόνα των καταβοθρών που παρουσιάστηκαν κατά την κατασκευή και των εισροών νερού. (K.I Song et al. 2012)

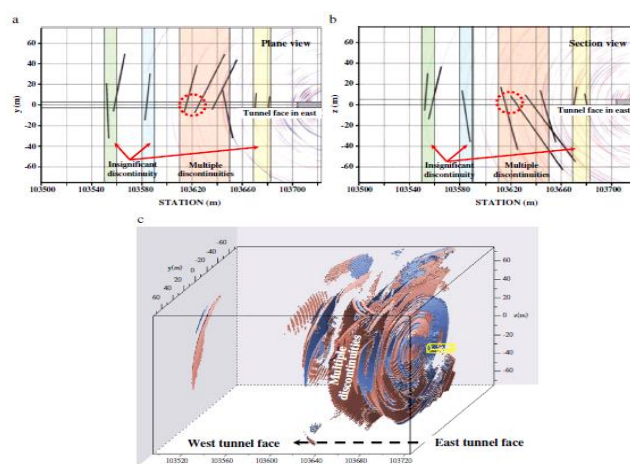
Πριν την κατασκευή της σήραγγας, πληροφορίες όπως ο βαθμός διάλυσης του ασβεστόλιθου και καταπόνησης του, καθώς και η παρουσία σπηλαίων και καταβοθρών δεν ήταν διαθέσιμες. Μετά την παρουσία καταβοθρών και καθιζήσεων, ξεκίνησε η εντατική έρευνα της περιοχής. Η αναγνώριση της περιοχής και η γεωλογική έρευνα των χαρακτηριστικών της έλαβε χώρα για να επαληθεύσει και να εμπλουτίσει τα αποτελέσματα της πρωταρχικής έρευνας. Μέθοδοι του υπεδάφους, όπως η χρήση γεωφυσικών μεθόδων (έρευνα ηλεκτρικής αντίστασης, μέθοδος TSP) και έρευνες βάση γεωτρήσεων, εφαρμόστηκαν στις καταβόθρες και στις καθιζήσεις

για να χαρακτηριστούν οι γεωλογικές δομές και να αναγνωριστεί η αιτία σχηματισμού τους.

Από την αναγνώριση της περιοχής, γύρω από τις καταβόθρες παρατηρήθηκε ασβεστόλιθος. Οι ασυνέχειες ήταν καλά ανεπτυγμένες, ενώ παρατηρούνταν και μικρές κοιλότητες τόσο κατά μήκος του κυρίως πετρώματος, όσο και στις ζώνες απορροής στο εσωτερικό της σήραγγας. Η διάλυση και η αποσάθρωση των ασυνεχειών προκάλεσε συστήματα κοιλοτήτων, καταβόθρες και υποχώρηση της επιφάνειας του εδάφους.

Τα συστήματα ασυνεχειών καταγράφηκαν βάση της ανάλυσης δορυφορικών εικόνων και τοπογραφικών χαρτών της περιοχής. Με την χρήση μιας εικόνας ενός χάρτη αναγλύφου που εξάχθηκε από τον δορυφόρο Landsat TM satellite οριοθετήθηκαν τέσσερα συστήματα ασυνεχειών κατά μήκος της περιοχής έρευνας.

Με τη μέθοδο TSP, η οποία βασίζεται στην μετάδοση των ελαστικών κυμάτων και στην αναγνώριση των ασυνεχειών χωρίς την διατάραξη της μάζας του πετρώματος, μπόρεσαν να οπτικοποιηθούν οι γεωλογικές δομές που θα συναντιούνταν στην εκσκαφή του μετώπου. Εφαρμόστηκε λοιπόν και για τις δύο κατευθύνσεις εκσκαφής της διαδρομής της σήραγγας, με σκοπό να καθορίσει την κατάλληλη μέθοδο εκσκαφής και υποστήριξης. Η εικόνα 3.4 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της έρευνας μπροστά στο ανατολικό μέτωπο της σήραγγας. Η προβολή του επιπέδου και της περιοχής των αποτελεσμάτων TSP παρουσιάζουν την ύπαρξη πολλαπλών ζωνών αδυναμίας και ασυνεχειών στο μελλοντικό τμήμα εκσκαφής.



Εικόνα 3.4 : Τα αποτελέσματα της μεθόδου TSP στο ανατολικό μέτωπο της σήραγγας (K.I Song 2012)

Με τις γεωτρήσεις που έγιναν στην περιοχή, στην γεώτρηση BW-1 παρατηρήθηκε κερματισμένος ασβεστόλιθος, 2μ κάτω από την επιφάνεια του εδάφους με ποιότητα μέτρια προς καλή. Σημαντικά κερματισμένες ζώνες με κοιλότητες και ρήγματα βρέθηκαν στον πυρήνα της γεώτρησης BE-1. Η γεώτρηση BE-3 έφερε στην επιφάνεια ιζηματογενή πετρώματα όπως ψαμμίτη και κροκαλοπαγές, δείχνοντας πως μια ζώνη αδυναμίας τοποθετείται μεταξύ των 27-33μ σε βάθος από την επιφάνεια. Επιπλέον δείγματα της γεώτρησης BE-2 κάτω από τον σιδηρόδρομο, αποτελούνταν από ασβεστόλιθο, γεγονός που αποδεικνύει πως ολόκληρη η σιδηροδρομική γραμμή κατασκευάζεται σε έναν ασβεστόλιθο με τοπικές ζώνες ρωγμάτωσης.

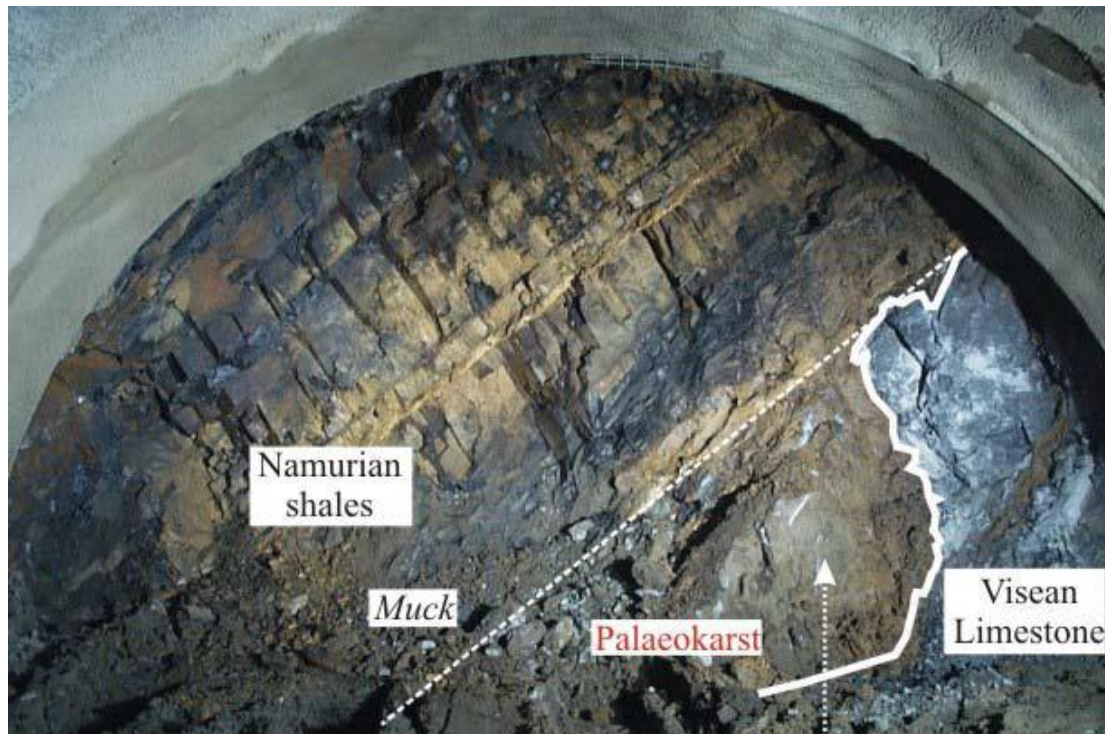
Τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά των καρστικών σχηματισμών επηρεάζουν σημαντικά τον σχηματισμό καταβοθρών και κενών στους ασβεστολίθους. Γι' αυτό τον λόγο σχεδιάστηκαν τεστ υδροπερατότητας, και μετρήθηκαν τα χαρακτηριστικά της υπόγειας ροής, όπως η κατεύθυνση και το μήκος της. Ο υδροφόρος ορίζοντας κυμαίνεται από 2,5-4μ κάτω από την εδαφική επιφάνεια. Η υδραυλική κλίση, οι γεωλογικές δομές και η περατότητα των πετρωμάτων είναι οι βασικοί παράγοντες που καθορίζουν τις συνθήκες υπόγειας ροής.

Συμπεραίνεται ότι η εισροές νερών και καφέ αργίλου σε συνδιασμό με την ανάπτυξη καταβοθρών προκλήθηκαν από την αλληλεπίδραση των συστημάτων αγωγών μικρο-κοιλοτήτων που σχηματίστηκαν από το σημείο τομής των ασυνεχειών και των καρστικών κοιλοτήτων κατά μήκος των διαφορετικών πετρωμάτων και της υπόγειας δραστηριότητας νερού.

Η σήραγγα λοιπόν κατά την κατασκευή της αποσταθεροποίησε τις κοιλότητες και προκάλεσε την εισροή νερού και καφέ αργίλου μέσω των αγωγών των συστημάτων κοιλοτήτων. Τέλος η εισροή στο εσωτερικό της σήραγγας προκάλεσε την αποστράγγιση του νερού μαζί με μαλακά υλικά των κοιλοτήτων και οδήγησε στον σχηματισμό καταβοθρών.

Στην τοποθεσία **Soumagne** του Βελγίου κατασκευάστηκε μια σήραγγα υψηλών ταχυτήτων στη Λιέγη το 2004. Η σήραγγα αυτή έπρεπε να διαπεράσει μέσα από συνθήκες παλαιοκάρστ. Αυτές προβλέφθηκαν πριν την κατασκευή της. Η έρευνα αποτελούνταν από 105 γεωτρήσεις γεωφυσικές, γεωτεχνικές και υδρογεωλογικές, μετρήσεις μικροβαρύτητας για να εντοπιστούν οι καρστικές κοιλότητες και διατρήσεις προπορείας. Εντοπίστηκε λοιπόν ότι υπήρχε μια ανωμαλία

λιθανθρακοφόρου παλαιοκάρστ. Με την γνώση λοιπόν τέτοιων πληροφοριών είναι δυνατή η πρόβλεψη των καρστικών φαινομένων κατά μήκος της σήραγγας χωρίς πάντα την ακριβή θέση του κάθε έγκοιλου. Εφαρμόστηκαν διαφορετικές μέθοδοι υποστήριξης ανάλογα με τα γεωμηχανικά χαρακτηριστικά (εκτοξευμένο σκυρόδεμα, αγκύρια swellex) και εργαλεία εκσκαφής ανάλογα με το είδος του πετρώματος. Στις πιο δύσκολες θέσεις χρησιμοποιήθηκαν δοκοί προπορείας.



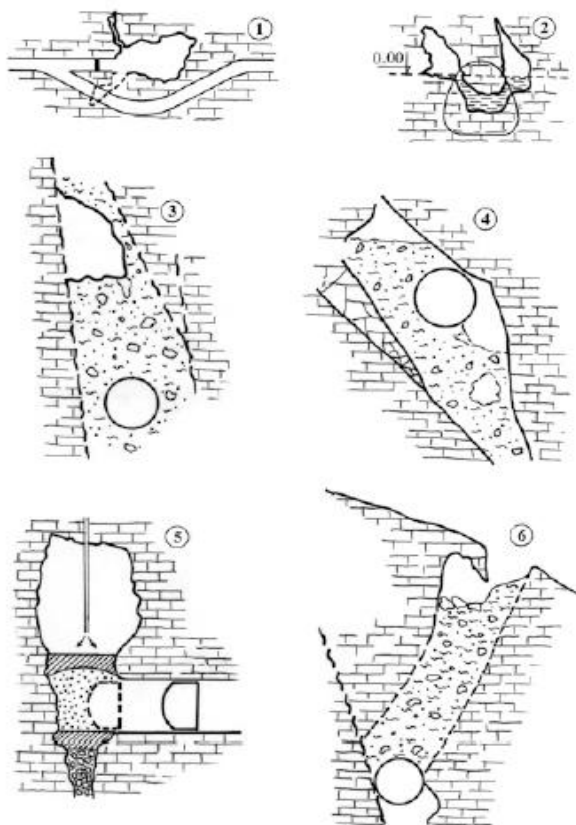
detached Visean limestone blocks

Εικόνα 3.5: Μέτωπο της σήραγγας κατά την διάρκεια κατασκευής της που απεικονίζει το παλαιοκαρστ ανάμεσα στην επαφή του σχιστολίθου και ασβεστολίθου (Photo: Courtesy of S.M. Soumagne Tunne)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΟΥ-ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΑΙ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

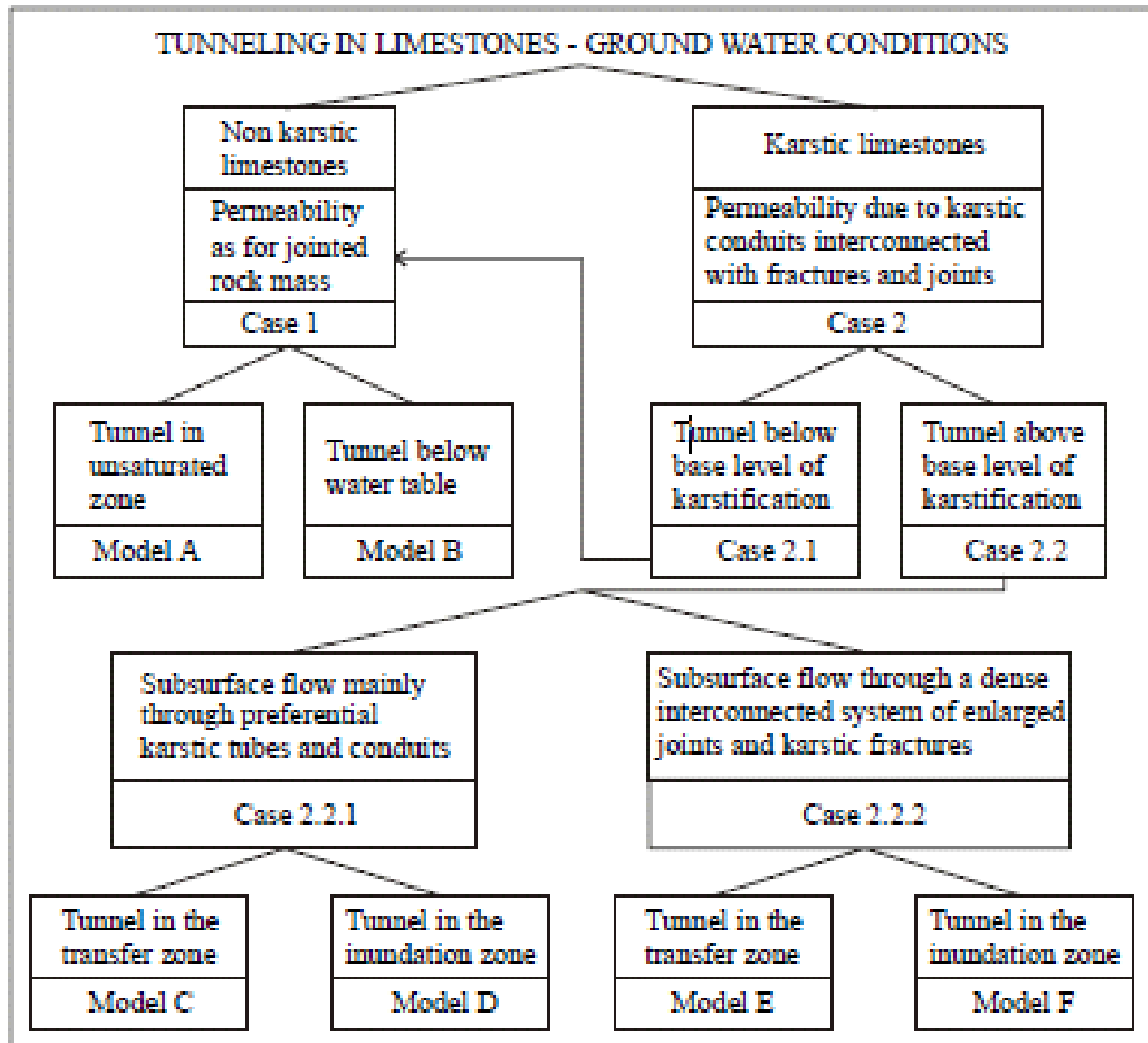
4.1: ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ-ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Οι σήραγγες σε περιβάλλον καρστ αποτελούν αρκετά ευπαθείς δομές. Τα μεγάλα σπήλαια και η εισροές υπόγειου νερού καθυστερούν την εκσκαφή. Χαρακτηριστικά παραδείγματα φαίνονται στο σχήμα 4.1 με (1) την εκσκαφή γύρω από ένα σπήλαιο, (2) την εκσκαφή μέσα από ένα σπήλαιο στο επίπεδο της θάλασσας, (3) και (4) την εκσκαφή μέσα από μία κοιλότητα πληρωμένη με υλικό, (5) την ενίσχυση μιας κενής κοιλότητας στο σημείο το TBM και (6) την κατάρρευση στην επιφάνεια λόγω της διατάραξης από την διάνοιξη.

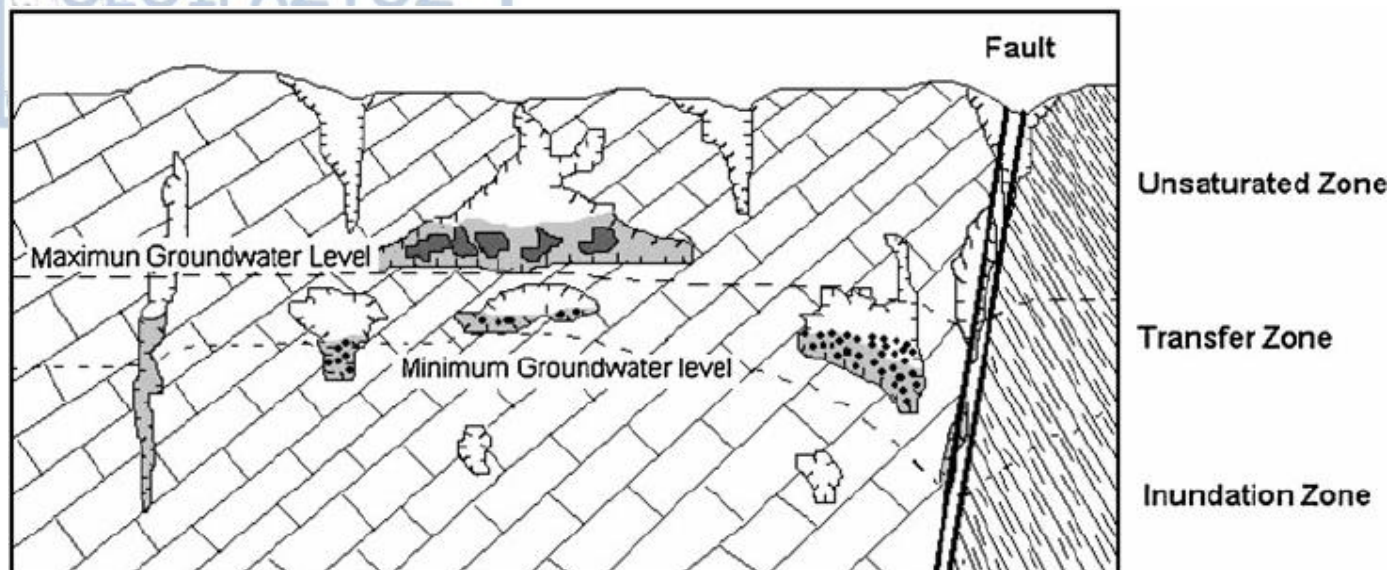


Σχήμα 4.1: Διαφορετικά παραδείγματα μοντέλων σηραγγών που κατασκευάζονται σε σπηλαιώδες περιβάλλον. (Milanović P. 2014)

Από υδρογεωλογική άποψη τα μοντέλα των σπηράγων κατασκευάζονται είτε κάτω από την μέγιστη στάθμη του υπόγειου νερού, είτε στην ζώνη ανάμεσα στην μέγιστη και ελάχιστη στάθμη, είτε κάτω από την ελάχιστη στάθμη, στην κορεσμένη ζώνη. Διαφέρουν ανάλογα με την γεωμετρία του καρστικού υδροφορεα και την θέση κατασκευής του έργου.



Πίνακας 4.1: Τα υδρογεωλογικά μοντέλα σε περιβάλλον ασβεστόλιθου. (Marinos P.G., 2001. Tunelling and mining in karstic terrane; an engineering challenge. KeyonoteLecture)

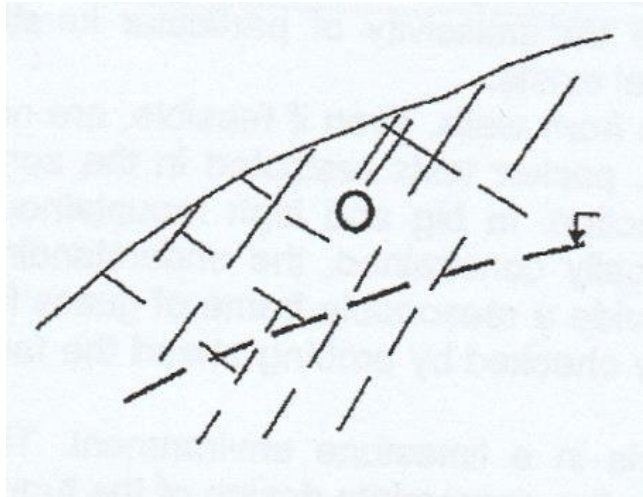


Σχήμα 4.2: Ο καρστικός υδροφόρος μπορεί να χωριστεί σε 3 ζώνες. Την μη κορεσμένη, την ενδιάμεση ζώνη και την κορεσμένη. Η μη κορεσμένη ζώνη τοποθετείται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους και χαρακτηρίζεται από ξηρές διακλάσεις, κοιλάδες και αγωγούς. Το νερό κινείται σχεδόν κάθετα στην κατώτερη ενδιάμεση ζώνη. Κάτω από αυτές τις συνθήκες η σήραγγα διέρχεται από εντελώς ξηρές μάζες ασβεστολίθων με παρουσία καρστικών χαρακτηριστικών. Η ενδιάμεση ζώνη χαρακτηρίζεται από έντονα καρστικοποιημένα πετρώματα. Η σήραγγα σε αυτή την ζώνη διαπερνά ξηρές μάζες πετρωμάτων. Τέλος η ζώνη κορεσμού τοποθετείται κάτω από το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα και χαρακτηρίζεται από συνεχή ροή νερού. (Hamid R. et al. 2012)

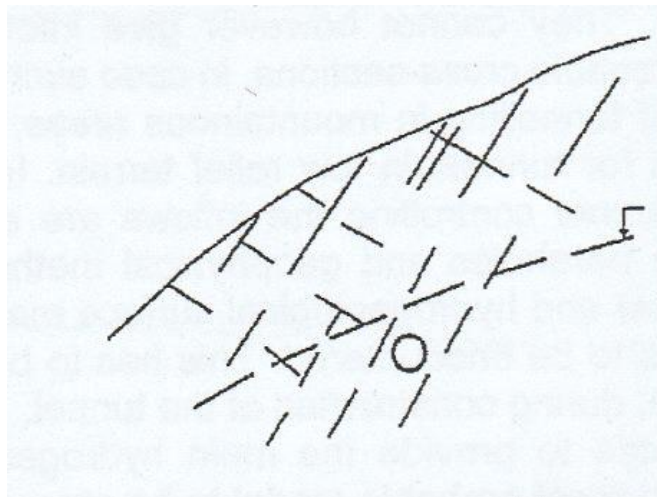
Ο πίνακας 4.1 παρέχει πληροφορίες για τα βασικά υδρογεωλογικά μοντέλα σε περιβάλλον ασβεστολιθού. Η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου διευκολύνει στην επιλογή του κατάλληλου σχεδιασμού της σήραγγας και στην μελέτη του απαραίτητου εξοπλισμού για την αντιμετώπιση κινδύνων που σχετίζονται με τις καρστικές συνθήκες.

- Στην 1η περίπτωση το πέτρωμα δεν είναι καρστικοποιημένο, είναι διαρρηγμένο και το νερό διέρχεται από τα κενά του. Η περατότητά του γενικά είναι χαμηλή και μειώνεται δραματικά με το βάθος. Εξαιρέση αποτελούν οι ζώνες ρηγμάτων. Τα μοντέλα της πρώτης περίπτωσης είναι τα εξής:
- Σήραγγα σε ακόρεστη ζώνη: διαπερνά έναν στεγνό ασβεστόλιθο, χωρίς επικινδυνότητα για πλημμύρες.

- Σήραγγα κάτω από το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα: η σήραγγα αντιμετωπίζει μέτρια έως ασήμαντη ροή, η ποία εξαρτάται από την συχνότητα και το άνοιγμα των ασυνεχειών ή διακλάσεων. Σε μεγάλα βάθη η περατότητα είναι πρακτικά μηδενική.

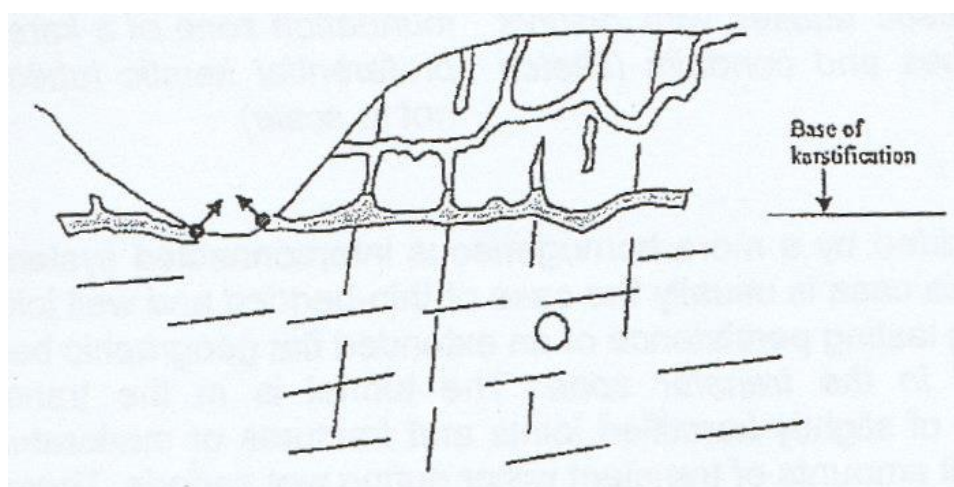


Σχήμα 4.3: 1η Περίπτωση - Σήραγγα σε μη κορεσμένη ζώνη μη καρστικοποιημένου ασβεστολίθου. "Μοντέλο Α". (Marinos P.G., 2001)



Σχήμα 4.4: 1η περίπτωση - Σήραγγα κάτω από το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα μη καρστικοποιημένου ασβεστολίθου. "Μοντέλο Β". (Marinos P.G., 2001)

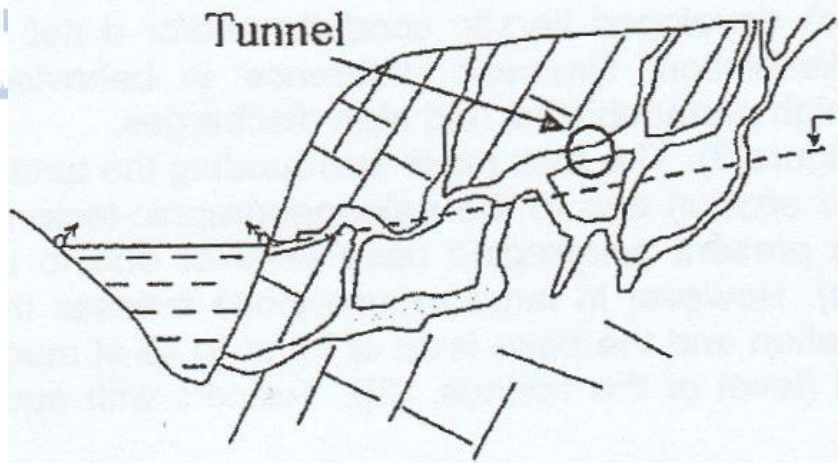
- Στην 2η περίπτωση το πέτρωμα είναι καρστικοποιημένο, ενώ η περατότητα είναι υψηλή, λόγω αρκετά ανεπτυγμένων καρστικών αγωγών ή/και δικτύου ασυνεχειών και διακλάσεων λίγο ή πολύ διευρυμένων από την διάλυση. Παρατηρούνται δραματικές αλλαγές στην συμπεριφορά σε σχέση με τα άλλα υδροφόρα συστήματα, με παρουσία υψηλής περατότητας και εκφόρτισης.
- Στην περίπτωση 2.1 η σήραγγα βρίσκεται κάτω από το βασικό επίπεδο καρστικοποίησης. Η μάζα του πετρώματος που περιβάλλει την σήραγγα δεν έχει εκτεθεί ποτέ σε υπόγεια διάβρωση λόγω παλαιογεωγραφικών και τεκτονικών οριζόντιων κινήσεων της σε σχέση με το τωρινό γεωγραφικό επίπεδο, ή λόγω της απομόνωσης από την διεύδυση και εκροή σε πηγές. Βέβαια σε περιοχές βουνών, το εσωτερικό των βουνών μπορεί να έχει μην έχει καρστικοποιηθεί και το επίπεδο βάσης του καρστ να είναι σε πολύ υψηλότερα επίπεδα από το τωρινό γεωγραφικό επίπεδο(επίπεδο πηγών). Το μοντέλο **B** αντιστοιχεί σε αυτή την περίπτωση.



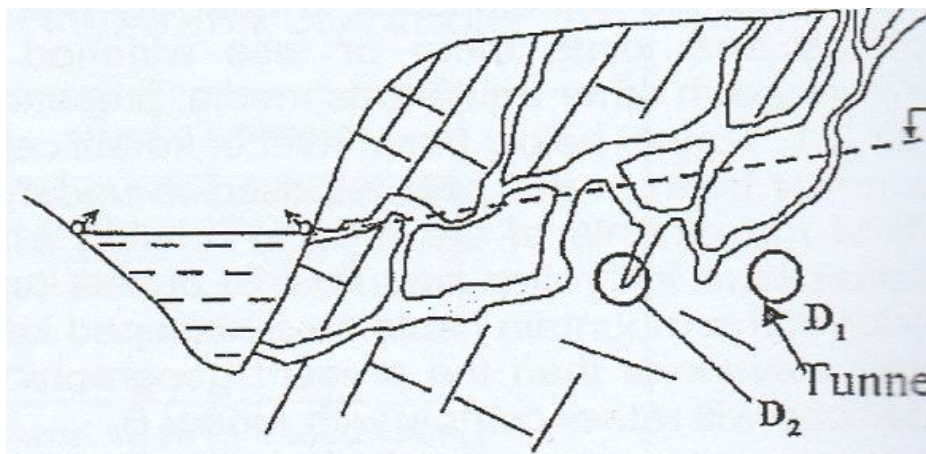
Εικόνα 4.5: Περίπτωση 2.1 - Σήραγγα κάτω από το βασικό επίπεδο καρστικοποίησης. (Marinos P.G., 2001)

- Στην περίπτωση 2.2 η σήραγγα βρίσκεται πάνω από το βασικό επίπεδο καρστικοποίησης. Το μέγεθος των προβλημάτων και οι κίνδυνοι βασίζονται στην γεωμετρία του καρστικού υδροφορέα. Διακρίνεται σε:

- 2.2.1 περίπτωση: η ροή του υπόγειου νερού συγκεντρώνεται σε συγκεκριμένους μεγάλους καρστικούς αγωγούς. Αυτή είναι συχνά μια περίπτωση όπου παρατηρείται συνεχής υπόγεια διάβρωση αφού το γεωγραφικό επίπεδο βάσης προχωρά προς τα χαμηλότερα επίπεδα ή όπου το χαμηλότερο γεωγραφικό επίπεδο είναι συγκεντρωμένο σε μια περιορισμένη ζώνη. Οι καρστικοί σωλήνες και αγωγοί έχουν προσανατολισμό προς τα οριζόντια όταν φτάουν στο βασικό επίπεδο αποστράγγισης του καρστικού υδροφορέα. Περισσότεροι οριζοντιοποιημένοι αγωγοί πιθανόν να έχουν αναπτυχθεί κατά την διάρκεια της παλαιογεωγραφικής εξέλιξης της περιοχής.
- Σήραγγα μέσα στην ενδιάμεση ζώνη. Διαπερνά ξηρούς ασβεστολίθους υψηλής καρστικοποίησης. Θα διαπεράσει ξηρούς καρστικούς αγωγούς, αλλά αν τοποθετηθεί σε μεγαλύτερα βάθη, η επικινδυνότητα για πλημμύρες και απότομες εισροές θα είναι υψηλή όταν συμβαίνουν καταιγίδες στην περιοχή. Επιπλέον η στατικότητα της σήραγγας μπορεί να βρίσκεται σε κίνδυνο. Διάβρωση ή χαλάρωση του υλικού πλήρωσης μπορεί να οδηγήσει σε λασπορροές στο εσωτερικό της σήραγγας. Τέλος η μόλυνση της επιφάνειας ύδατος που υπόκειται είναι πολύ πιθανή.
- Σήραγγα στο εσωτερικό της κορεσμένης ζώνης . Η σήραγγα είτε θα αποστραγγίσει καλά ανεπτυγμένους καρστικούς αγωγούς ή/και την θεμελιώδη μάζα γύρω από αυτά.
 - **D1:** Σήραγγα σε κορεσμένη ζώνη. Η σήραγγα διοχετεύει το νερό σε μεγαλύτερα βάθη μέσω των καρστικών αγωγών σε μέτριες ποσότητες. Αυτές οι ποσότητες εμπλουτίζονται με νερό που αποθηκεύεται σε διακλάσεις και ασυνέχειες των αγωγών. Κατά την κατασκευή η σήραγγα μπορεί εύκολα και απότομα να διακόψει τους καρστικούς αγωγούς. Ως αποτέλεσμα μπορεί να παρατηρηθεί απότομη αύξηση της εισροής νερού ή ακόμη και πλημμυρικά φαινόμενα στο εσωτερικό της σήραγγας.
 - **D2:** Η σήραγγα αντιμετωπίζει την μεγάλη μεταβιβαστικότητα της κορεσμένης ζώνης και των καρστικών αγωγών της.



Σχήμα 4.6: Περίπτωση 2.2.1 - Σήραγγα στην ενδιάμεση ζώνη καρστικού υδροφορέα με μεγάλους καρστικούς αγωγούς - "Μοντέλο C". (Marinos P.G. 2001)

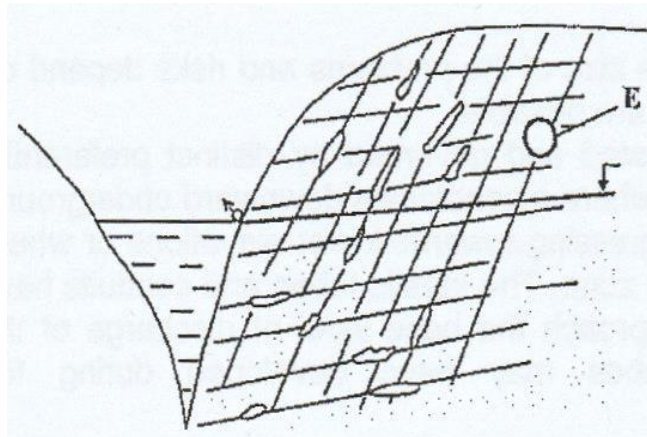


Σχήμα 4.7 : Περίπτωση 2.2.1: Σήραγγα στην καρστικοποιημένη ζώνη του καρστικού υδροφορέα με μεγάλους καρστικούς αγωγούς. "Μοντέλο D". (Marinos P.G. 2001)

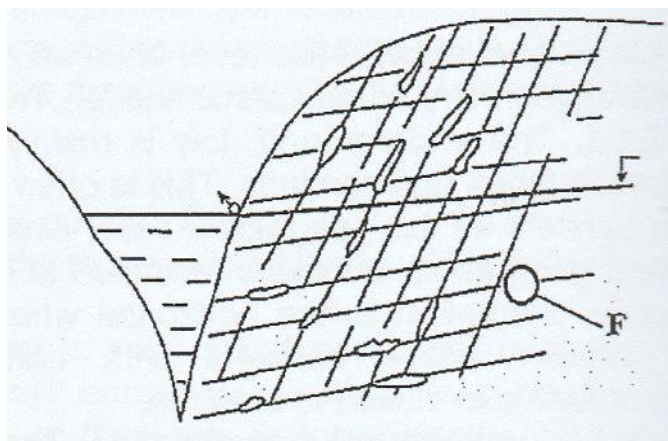
- 2.2.2 περίπτωση: η ροή καθοδηγείται από ένα ομογενές σύστημα καρστικών ρωγμών με μεγάλες ασυνέχειες. Αυτή η περίπτωση αφορά κυρίως λεπτοστρωματώδεις και κερματισμένους ασβεστολίθους

Ε. Σήραγγα μέσα στην ενδιάμεση ζώνη. Βρίσκεται στο εσωτερικό ενός πυκνού συστήματος καρστικοποιημένων ασυνεχειών και διακλάσεων με μέτρια μεγέθη. Διαπερνά μια μάζα με διασταλλάζοντα νερά ή μικρές ποσότητες από παροδικά νερά κατά την διάρκεια υγρών περιόδων. Δεν υπάρχει κίνδυνος για πλημμύρες, αφού η διήθηση είναι ευρέως διαδεδομένη στο εσωτερικό της καρστικής μάζας.

Ε. Σήραγγα σε κορεσμένη ζώνη. Η σήραγγα που βρίσκεται στην κορεσμένη ζώνη αποστραγγίζει σημαντικές ποσότητες επιφανειακών νερών κατά την κατασκευή, προκαλώντας την ανάγκη εξοπλισμού αποστράγγισης.



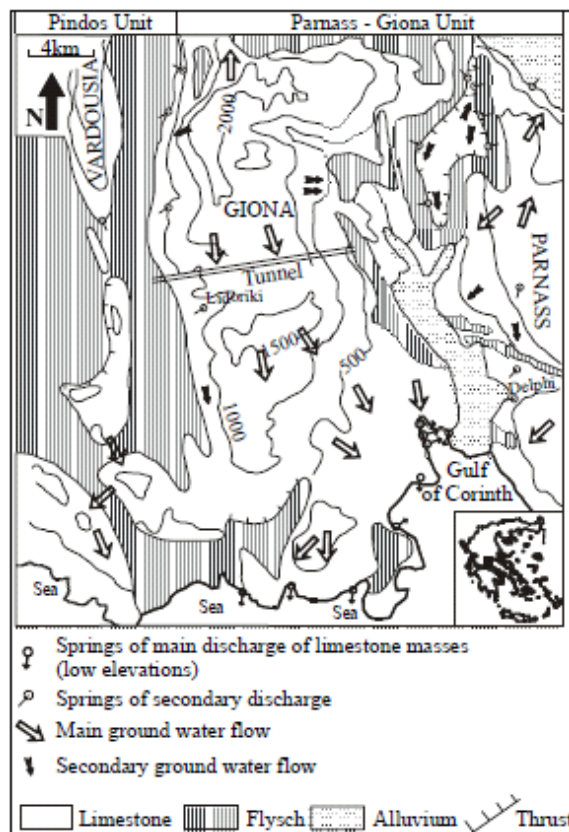
Σχήμα 4.8: Περίπτωση 2.2.2 - Σήραγγα στην ενδιάμεση ζώνη ενός ανεπτυγμένου συστήματος διακλάσεων και ασυνεχειών μεγάλου μεγέθους, "Μοντέλο Ε". (Marinos P.G. 2001)



Σχήμα 4.9: Περίπτωση 2.2 - Σήραγγα στην ενδιάμεση ζώνη ενός ανεπτυγμένου συστήματος διακλάσεων και ασυνεχειών μεγάλου μεγέθους, "Μοντέλο F". (Marinos P.G. 2001)

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα της εφαρμογής των υδρογεωλογικών μοντέλων είναι αυτό στην περιοχή της **Γκιώνας**, όπου κατασκευάστηκε η σήραγγα Γκιώνας για την παροχή νερού στο υδραγωγείο Μόρνου-Αθηνών. Η σήραγγα έχει έκταση 14,6 χλμ, με υψόμετρο 377μ και με το κεντρικό τμήμα να απέχει 14-20 χλμ από τον Κορινθιακό κόλπο, όπου τα υπόγεια νερά εκφορτίζονται μέσα από μεγάλες παράκτιες πηγές (εικόνα 4.1). Αρχικά η έντονη καρστικοποίηση που παρουσιαζόταν στην

επιφάνεια του βουνού και η αποστράγγιση προς τα κατώτερα μέρη της ακτογραμμής οδήγησε στην υπόθεση ότι η σήραγγα θα κατασκευαζόταν σε περιβάλλον καρστικοποιημένου ασβεστολίθου, αλλά σχεδόν πάνω από την στάθμη του υδροφόρου, λόγω της ήπιας υδραυλικής κλίσης. Η περίπτωση αυτή αντιστοιχεί στο μοντέλο C, του πίνακα 4.1. Η σήραγγα λοιπόν αναμένονταν να είναι στο εσωτερικό της ενδιάμεσης ζώνης του υπόγειου συστήματος με μεγάλη πιθανότητα εισροών, αλλά χωρίς μόνιμη την παρουσία



Εικόνα 4.1: Υδρογεωλογικός χάρτης του καρστικοποιημένου βουνού της Γκιόνας και η τομή της σήραγγας του υδραγωγείου Μόρνου-Αθηνών. (Marinos P.G. 2001)

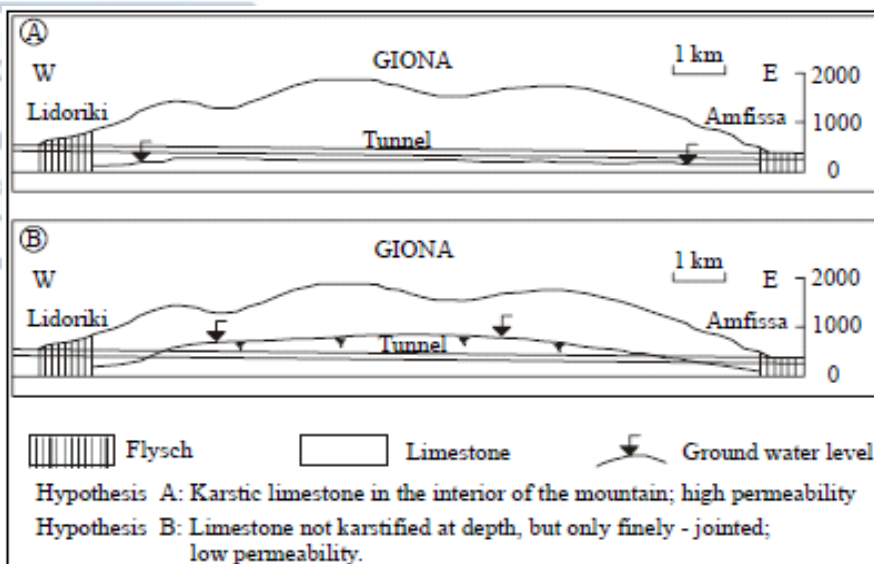
υπόγειου νερού. Αυτός ο υπόγειος υδροφορέας θα ήταν χαμηλότερα σε θέσεις υψηλής περατότητας και ανεμπόδιστης αποστράγγισης στην ακτή.

Ωστόσο με ορισμένες ερευνητικές γεωτρήσεις, όχι μεγάλου βάθους, παρουσιάστηκαν δεδομένα ενός ασβεστολίθου που δεν μπορεί να είναι καρστικοποιημένος σε βάθος, αλλά με κάποιες σχισμές. Σε αυτή την περίπτωση αντιστοιχεί το μοντέλο B του πίνακα 4.1, με τον υδροφορέα να είναι πάνω από την σήραγγα και με χαμηλές αποδόσεις εισροών.

Τελικά κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι πρόκειται για έναν συνδυασμό των δύο μοντέλων. Το εσωτερικό του ασβεστολιθικού βουνού δεν παρατηρείται καρστικοποιημένο, με την καρστικοποίηση να σταματά σε βάθος μερικών εκατοντάδων μέτρων, σχηματίζοντας μια καρστική ζώνη που εκτείνεται παράλληλα στην επιφάνεια του βουνού. Η παλαιογεωγραφική εξέλιξη της περιοχής, με σταδιακή επιφανειακή διάβρωση και εξομάλυνση της επιφάνειας λόγω αλλεπάλληλων ρηγμάτων και αλλαγών της θαλάσσιας στάθμης, οδήγησαν στην δημιουργία μιας υπόγειας καρστικής γεωμετρίας. Κάτω από την καρστική ζώνη οι ασβεστόλιθοι παρουσιάζονται σχετικά συμπαγείς με μικρότερη περατότητα.

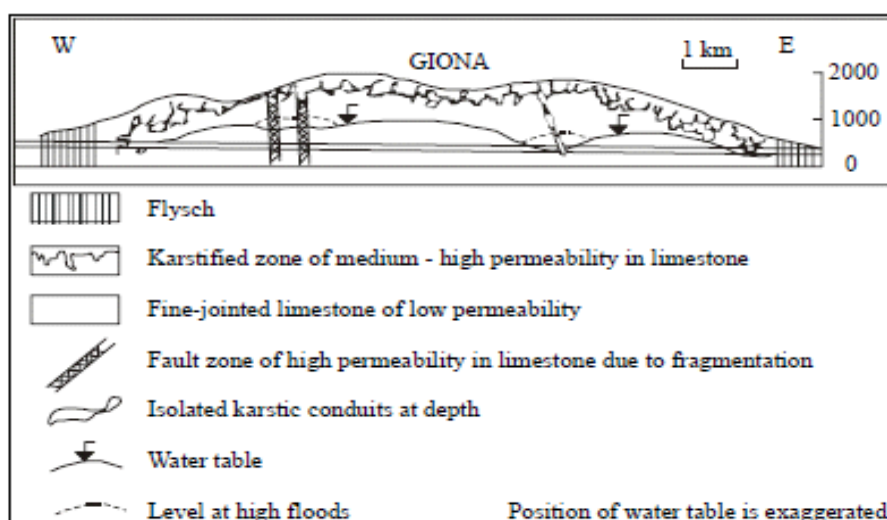
Η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα παρουσιάζει μικρές κλίσεις μόνο στην καρστική ζώνη, ενώ αυτές γίνονται πιο απότομες στο εσωτερικό του βουνού με την μικρότερη περατότητα. Στα εξωτερικά καρστικοποιημένα τμήματα του βουνού η στάθμη του υδροφόρου είναι κάτω από το επίπεδο της σήραγγας και αυτή ανεβαίνει στο μη καρστικοποιημένο τμήμα του. Η απορροή είναι μετά βίας αντιληπτή με την μορφή υγρασίας στα τοιχώματα της σήραγγας.

Ωστόσο στο εσωτερικό του βουνού παρατηρήθηκαν και ορισμένες ζώνες καρστικών αγωγών, υψηλής περατότητας, κυρίως σε θέσεις ρηγμάτων. Οι ζώνες αυτές αποτελούν μια εξαίρεση και δεν αλλοιώνουν την γενική εικόνα του μη καρστικοποιημένου ασβεστολίθου σε μεγαλύτερα βάθη. Απέχουν 9,8χλμ και 6,5χλμ από την δυτική είσοδο της σήραγγας. Αυτοί οι καρστικοί αγωγοί, αποτελούν απομονωμένους άξονες από τους οποίους μπορεί να αποστραγγιστεί νερό, γεγονός που μπορεί να παρομοιαστεί με το μοντέλο C ή D του πίνακα 4.1 χωρίς όμως έκταση σε βάθος του βουνού.



Σχήμα 4.10 : Σχηματική απεικόνιση των 2 μοντέλων καρστικής διάβρωσης κατά μήκος της σήραγγας . (Marinos P.G. 2001)

Τέλος η παρουσία ρηγμάτων με ή χωρίς μυλωνιτωμένες ζώνες αποτελούν έναν σημαντικό παράγοντα που πρέπει να ληφθεί υπόψη. Αυτές οι ζώνες δεν παρουσιάζουν καρστικά χαρακτηριστικά ή κενά μέσα στις ασυνέχειές τους, αλλά μερικές από αυτές προκάλεσαν προβλήματα εισροών ειδικά στις θέσεις μεταξύ 9,3 χλμ και 10 χλμ. Τα ρήγματα που επιτρέπουν την εισροή νερού, αυξάνουν την υπόγεια υδραυλική ετερογένεια στο εσωτερικό του βουνού. Αυτά τα ρήγματα γεμίζουν με καρστικά και υδροπερατά υλικά της επιφάνειας του βουνού. Ως εκ τούτου, λόγω της γεωμετρίας των ρηγμάτων και της παροχευτικότητάς τους, το νερό που εισέρχεται μπορεί να αυξήσει την υπόγεια στάθμη παρά την υψηλή περατότητα των ζωνών αυτών. Έτσι οι γύρω ασβεστόλιθοι με λίγες ασυνέχειες, μπορεί να εμπλουτιστούν με νερό σε υγρές περιόδους ενώ σε ξηρές να αποστραγγιστούν.

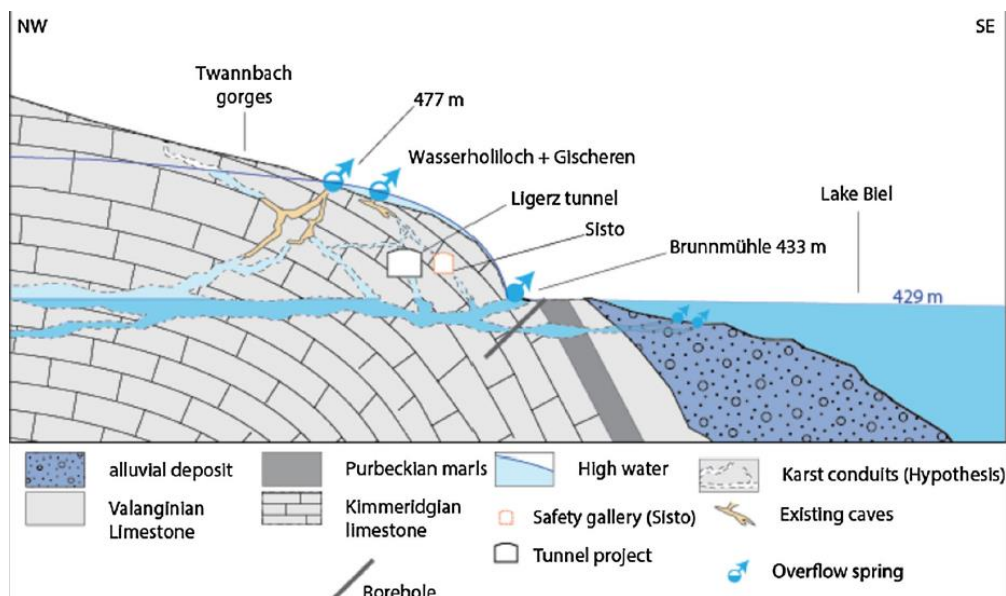


Σχήμα 4.11 : Υπόγεια υδραυλική κλίση της Γκίονας κατά μήκος της σήραγγας.(Marinos P.G. 2001.

Σήραγγα Twann (Ελβετία)

Στις περιοχές Twann-Ligerz κατασκευάστηκε το 1980 μια οδική σήραγγα μήκους 5 χιλ. Παρόλα αυτά λόγω της καρστικής υδρογεωλογίας της περιοχής η σήραγγα έπρεπε να διακοπεί. Για την ακρίβεια οι αρχές ήθελαν να κατασκευάσουν μια παράλληλη στοά ασφαλείας και να επεκτείνουν την σήραγγα, αφού έτσι είχε προσχεδιαστεί. Παρόλα αυτά η περιοχή εμπλουτίζεται από την πηγή Brunnmühle, η οποία αναδύεται από τον καρστικό υδροφόρο απευθείας στα σημεία των προβλεπόμενων κατασκευών. Γι αυτόν ακριβώς τον λόγο θεωρήθηκε απαραίτητη η μελέτη του καρστικού υδροφόρου τόσο για την μελέτη του πιθανού αντίκτυπου της κατασκευής της σήραγγας στην πηγή, όσο και της επιρροής της καρστικής υδρογεωλογίας στην σήραγγα.

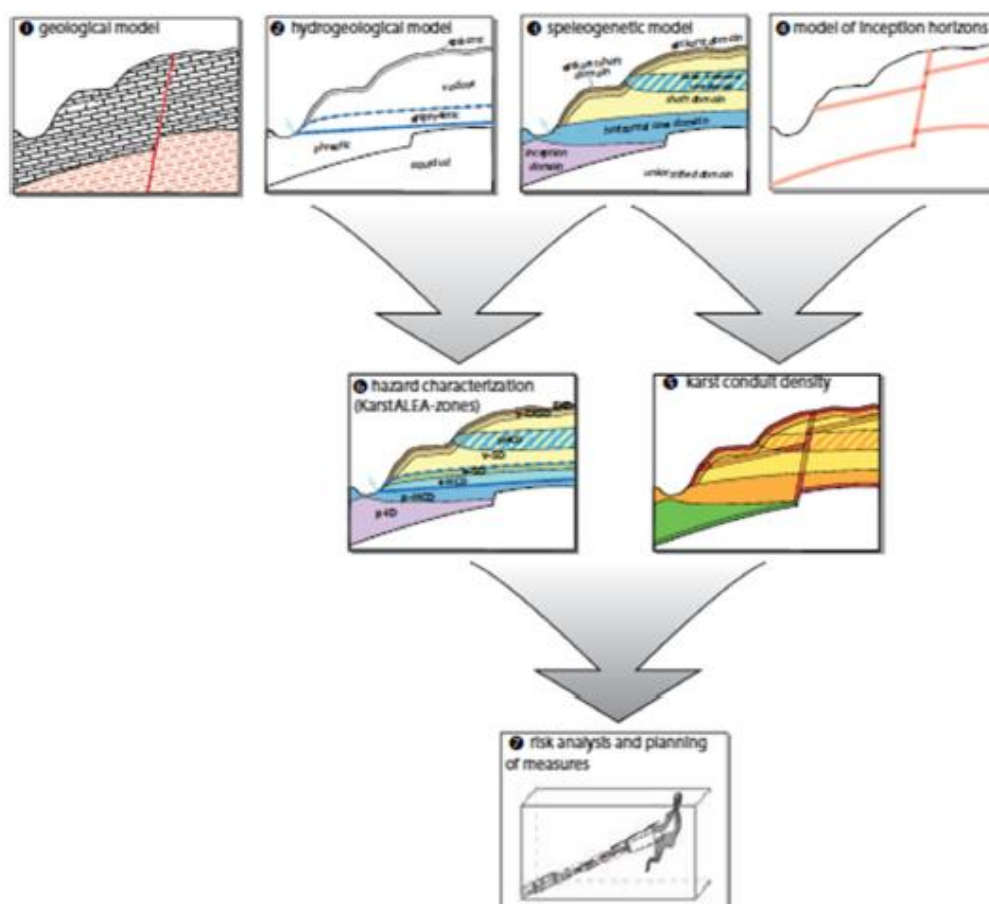
Η μέθοδος που εφαρμόστηκε ονομάστηκε KarstALEA(Filipponi et al. 2012) και αποκαλύπτει την επικινδυνότητα του καρστ κατά μήκος της σήραγγας και ιδιαίτερα στα σημεία των αναδύμενων πηγών. Επιπλέον κατασκευάστηκε ένα υδραυλικό μοντέλο που περιελάμβανε όλες τις φυσικές και τεχνητές πιθανές εξόδους νερού. Η κατασκευή του επετεύχθη με πληροφορίες από έρευνες στην περιοχή, στα σπήλαια, μετρήσεις υδρογεωλογικών παραμέτρων και τοπικές ιχνηθετήσεις. Με βάση αυτό το μοντέλο βρέθηκαν διάφορα σενάρια πιθανών εισροών, γεγονός που μπόρεσε να δώσει πληροφορίες για το μέγεθος των εισροών στην στοά κατά την κατασκευή και τα πιθανά μέτρα που έπρεπε να ληφθούν για την αποφυγή τους.



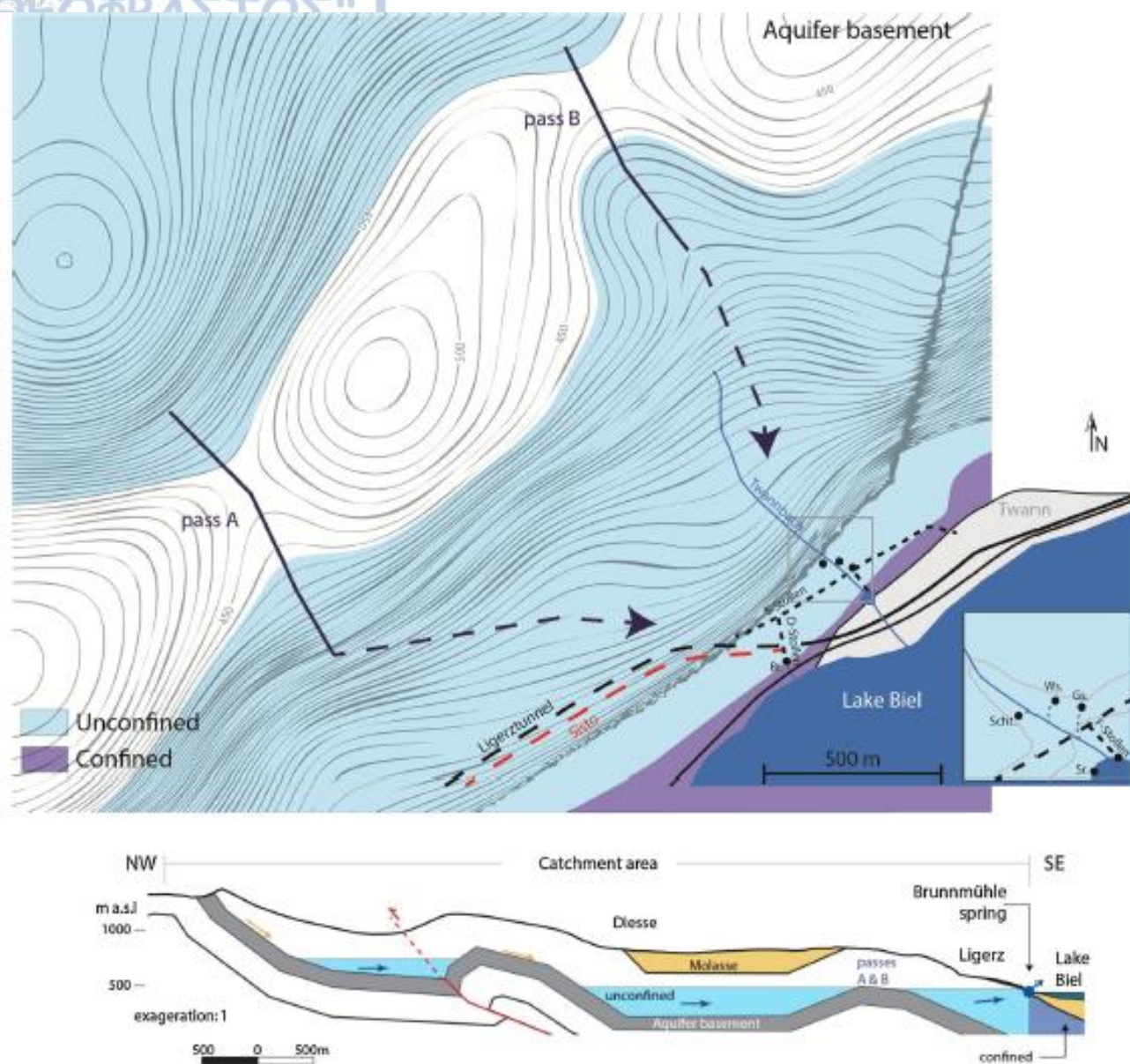
Σχήμα 4.12: Γεωλογικό μοντέλο της περιοχής.(Jeannin et al.2013)

Η περιοχή της κατασκευής είναι σε μια αντικλινική δομή στο ανατολικό τμήμα του βουνού Jura, δίπλα στην λίμνη Biel. Τα πετρώματα της θέσης αυτής είναι Ιουρασικοί και Κρητιδικοί ασβεστόλιθοι που υπόκεινται κάτω από πηλόλιθους Οξφορδίου. Η στοά (Sisto) κατασκευάζεται κατά μήκος της διεύθυνσης των στρώσεων. Η πηγή αναδύεται στην βάση του υποβάθρου, στην επαφή μεταξύ των πηλόλιθων και των ασβεστολίθων κοντά στην λίμνη. Εμπλουτίζεται από τον υδροφορέα του ιουρασικού ασβεστολίθου. 300 μέτρα βόρεια της πηγής βρίσκονται πολλές άλλες πηγές που αναδύονται ψηλότερα της σήραγγας.

Κατασκευάστηκαν λοιπόν μοντέλα όπως το γεωλογικό, το υδρογεωλογικό, σπηλαιολογικό, καθώς και ένα μοντέλο των αρχικών οριζόντων των στρωμάτων. Τα μοντέλα αυτά συνδυάστηκαν για την κατασκευή μοντέλων επικινδυνότητας της περιοχής βάση της έκτασης και της δράσης των καρστικών ζωνών.



Σχήμα 4.13: Το μοντέλα που σχεδιάστηκαν για την κατασκευή της σήραγγας.. (Jeannin et al. 2013)



)

Εικόνα 4.2: Το υδρογεωλογικό μοντέλο του υδροφορέα υποδηλώνει ότι οι 2 φρεατικές ζώνες διαχωρίζονται από ένα αντίκλινο. Η βορειοδυτική ζώνη αναφέρεται στο τμήμα του υδροφόρου που υπόκειται του πλατώ Diesse. Σύμφωνα με το μοντέλο, η άνοδος της φρεατικής ζώνης είναι 455 m a.s.l. Η νότια φρεατική ζώνη αναπτύσσεται ανάμεσα στους πρόποδες και τα παράλια, Η άνοδος της υπόγεια στάθμης είναι περίπου 435 m a.s.l. Ανάμεσα τους οι πηλόλιθοι αναπτύσσουν ένα στρώμα αδιαπέρατου υλικού που διαχωρίζει τις ζώνες. Παρόλα αυτά συμπεραίνονται δύο περάσματα από το μοντέλο, τα οποία επιτρέπουν και την ροή αντίθετα στο ρεύμα. (Jeannin et al. 2013)

4.2: ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑ

Οι πιο σημαντικές συνθήκες οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπόψη για την κατασκευή μιας ασφαλούς σήραγγας είναι η ευστάθεια των τοιχωμάτων, η ευστάθεια του μετώπου, η παρουσία ρηγμάτων ή συμπιεστού εδάφους, η ποσότητα του εισερχόμενου νερού, η παρουσία αργιλικού εδάφους, αερίων, υψηλών θερμοκρασιών και καρστικών κενών.

Η κατασκευή μιας σήραγγας σε καρστικοποιημένο περιβάλλον μπορεί να επηρεάσει το νερό που βρίσκεται σε επιφανειακό περιβάλλον, το υπόγειο νερό, καθώς επίσης και να προκαλέσει καταρρεύσεις γεωλογικών σχηματισμών του εδάφους.

Η εισροές νερού συχνά παρασύρουν λάσπη και άμμο. Τα υλικά αυτά γίνονται ασταθή, λόγω της αλλαγής των μηχανικών τους χαρακτηριστικών και έτσι το νερό εισρέει, γεγονός που επηρεάζει σημαντικά την κατασκευή του έργου και προκαλεί καταστροφές. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι μόλυνσης του νερού στην κατασκευή της σήραγγας. Πρώτα από όλα η αποχέτευση της κατασκευής, όπως το απόβλητο νερό που προέρχεται από την ενεμάτωση και από την χρήση άλλων υλικών που έχουν ξεπλυθεί και αποβάλλονται στον υπόγειο υδροφορέα και στα τοπικά υδάτινα οικοσυστήματα. Συγκεκριμένα, αυξάνει το PH του νερού και προκαλεί χημικές αντιδράσεις επιβλαβείς για τους οργανισμούς που ζουν σε αυτό. Η έκχυση του νερού μιας σήραγγας λοιπόν επηρεάζει την διαδικασία και την ποιότητα του έργου, αλλά και το επιφανειακό και υπόγειο περιβάλλον που γειτονεύει με αυτό.

Η σήραγγα **Geleshan** βρίσκεται στο προάστιο ChongQing. Η περιοχή έχει πολλές δεξαμενές νερού και αποτελείται από υψηλής πίεσης νερό. Το νερό αυτό είναι κυρίως καρστικό. Η σήραγγα δέχτηκε ποσότητες νερού που αντιμετωπίστηκαν με αποστραγγιστικά μέτρα, τα οποία μπορεί να μείωσαν το επίπεδό του αλλά μετέφεραν επιβλαβείς ουσίες στο νερό της άρδευσης.

Στις καρστικές περιοχές υπάρχουν πολλές δομές αποθήκευσης του νερού. Το νερό μπορεί να αποθηκευτεί στο εσωτερικό μιας κοιλότητας ή καταβόθρας, σε κάποιον καρστικό αγωγό ή και στο υπόγειο υδροφορέα. Η διατάραξη των σπηλαιων και των υπόγειων υδροφορέων σε καρστικό έδαφος από την κατασκευή μιας σήραγγας είναι αναπόφευκτη. Όταν η αποστράγγιση μιας σήραγγας είναι υπερβολική προκαλεί υπόγεια διάβρωση στο περιβάλλον. Από την μια πλευρά η επικινδυνότητα εισροής νερού και λάσπης είναι υψηλή για την κατασκευή του έργου. Από την άλλη ωστόσο



θα καταστρέψει την ισορροπία του υπόγειου νερού και θα μειώσει την στάθμη του με αντίκτυπο στο περιβάλλον.

Απώτερος σκοπός λοιπόν είναι ο έλεγχός του νερού τόσο κατά την διάρκεια υλοποίησης όσο και κατά την λειτουργία του έργου, διότι μπορεί να επηρεάσει την ευστάθεια οροφής και μετώπου της σήραγγας και να καθυστερήσει την κατασκευή.

Η αλληλεπίδραση της κατασκευής μιας σήραγγας σε καρστικό περιβάλλον και της εξόρυξης με το υπόγειο νερό μπορεί να διαχωριστεί σε δύο τμήματα, ανάλογα με την χρονική στιγμή αλληλεπίδρασης. Συγκεκριμένα πρόκειται για:

Την αλληλεπίδραση κατά την κατασκευή της σήραγγας:

- Εισροές νερού στον υπόγειο χώρο, επηρεάζοντας τις διαδικασίες κατασκευής και πιθανόν μειώνοντας την ευστάθεια μετώπου και οροφής.
- Ξαφνικές εισροές από συγκεκριμένους γεωλογικούς σχηματισμούς (π.χ ρήγματα, κατακερματισμένες ζώνες) και χαλάρωση των υλικών πλήρωσης των ασυνεχειών. Η περίπτωση αυτή συναντάται σε σήραγγες σε πιο μικρά βάθη, αλλά οι καταρρεύσεις στην επιφάνεια έχουν αναφερθεί για βάθη τουλάχιστον 100 μέτρων.
- Ανάπτυξη των καταβόθρων σε ευπαθείς ζώνες λόγω σωλήνωσης ή εσωτερικής διάβρωσης
- Επιτάχυνση της διάλυσης ευδιάλυτων ιζημάτων.
- Μείωση της απόδοσης των πηγών και μείωση της εκφόρτισης του υπόγειου νερού σε αυτές.
- Προσωρινή μόλυνση του υπόγειου νερού, λόγω της διείδυσης ουσιών που χρησιμοποιούνται κατά την κατασκευή.
- Καθιζήσεις από συνεκτικά λεπτόκοκκα εδάφη ή διακλασμένες βραχώδεις μάζες, λόγω της αύξησης των πιέσεων από την πτώση στάθμης υπόγειου υδροφορέα. Παρατηρείται συνήθως σε αβαθείς σήραγγες που καλύπτονται από καρστικοποιημένα πετρώματα με περιορισμένο τον υπόγειο υδροφορέα.

- Την αλληλεπίδραση κατά την λειτουργία της σήραγγας:

- Διείσδυση χημικών και οργανικών νερών που έχουν έρθει σε επαφή με τον δρόμο και τις ράγες της σήραγγας μπορούν να υποβαθμίσουν την ποιότητα του υπόγειου νερού, εάν η σήραγγα διέρχεται από την μη κορεσμένη ζώνη.

- Άνοδος των πιεζομετρικών επιπέδων από την παρεμπόδιση της ροής του υπόγειου νερού από την σήραγγα. Η άνοδος είναι αισθητή όταν η σήραγγα είναι τοποθετημένη σε μικρά βάθη, κάτω από σχετικά ρηχά επίπεδα νερού και μπορεί να επηρεάσει το περιβάλλον κατασκευής και να προκαλέσει προσμείξεις σε περίπτωση κορεσμού.

- Επιρροή της υδροστατικής πίεσης στην επένδυση της σήραγγας.

- Κατάρρευση της σήραγγας από μεγάλη αυξομείωση της υδροστατικής πίεσης συνδεδεμένη με έλλειψη επένδυσής της.

- Σε περίπτωση σήραγγών μεταφοράς νερού με ανεπάρκεια στην επένδυση, η σχέση μεταξύ του νερού που μεταφέρεται στην σήραγγα και του νερού του περιβάλλοντα υδροφορέα μπορεί να προκαλέσει:

α)Εισροή μολυσμένων νερών στην σήραγγα ή και ανάπτυξη όλων των σχετικών προαναφερθέντων κινδύνων. Οι υπόγειες εκσκαφές περιλαμβάνουν ρευστά, όπως προϊόντα πετρελαίου, τα οποία σε πιέσεις κοντά στην ατμοσφαιρική μπορούν να μην επενδυθούν, εάν η ποιότητα του πετρώματος είναι καλή και αν η εκσκαφή είναι κάτω από το επίπεδο του νερού.

β)Διαρροές από αποχετευτικά συστήματα μπορούν να μολύνουν τον περιβάλλοντα υδροφορέα. Η διαρροή είναι πολύ σημαντική όταν πρόκειται για σήραγγες που μεταφέρουν νερό υψηλής πίεσης με τοξικά συστατικά.. Αυτά τα υγρά πρέπει να συγκρατηθούν από ισχυρή αδιάβροχη επένδυση.

Στην περίπτωση της σήραγγας της **Γκιώνας** που αναλύθηκε προηγουμένως, οι διαρροές (πιεζομετρική επιφάνεια στα 80μ) ήταν αδύνατες για το μεγαλύτερο μέρος του βουνού και η επιφάνεια του υδροφόρου παρουσιάζε ένα υψηλό υδροστατικό φορτίο που η κατασκευή ήταν ικανή να παραλάβει. Αντίθετα, η διαρροές από την σήραγγα ήταν πιθανές στα άκρα της σήραγγας, όπου η καρστική ζώνη τα διαπερνά.

Σε αυτά τα τμήματα, ένα πιο ισχυρό πρόγραμμα ενεμάτωσης έπρεπε να εφαρμοστεί, αφού το επίπεδο του καρστικού υδροφορέα εκτείνονταν χαμηλότερα από την σήραγγα.

Τα υπόγεια ύδατα στο εσωτερικό της σήραγγας μπορούν να αντιμετωπιστούν κυρίως με τις ακόλουθες διαδικασίες:

- μείωση της στάθμης του υδροφορέα με τον έλεγχο της αποστράγγισης ή αφυδάτωσής του μέσω άντλησης, μειώνοντας παράλληλα την υδροστατική πίεση και την αποστράγγιση στο εσωτερικό της σήραγγας.
- ενεμάτωση

Μέθοδοι όπως ο έλεγχος του εδάφους με τσιμεντολάσπη, συμπιεσμένο αέρα ή μηχανήματα εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης δεν μπορούν να εφαρμοστούν σε υψηλής καρστικοποίησης ασβεστολίθους. Συνήθως η αποστράγγιση είναι πιο αποτελεσματική και φθηνότερη απ'ότι οποιαδήποτε άλλη διαδικασία. Η προαποστράγγιση πριν της κατασκευή της σήραγγας είναι πιθανόν η πιο συνηθισμένη μέθοδος ελέγχου της στάθμης του νερού. Η τεχνική αυτή περιλαμβάνει κυρίως της μείωση της στάθμης του υδροφόρου με μια σειρά διατρήσεων όπως πηγαδιών ή γεωτρήσεων σε κάθε πλευρά της σήραγγας. Η αποστράγγιση μπορεί να επιτευχθεί μέσα από την ίδια την σήραγγα, όταν η αποστράγγιση από την επιφάνεια είναι αδύνατη. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με αποστραγγιστικές οπές από το μέτωπο, από αποστραγγιστική ομπρέλα που περιβάλλει την σήραγγα ή ακόμη και μέσα από την κατασκευή μικρών αποχετευτικών συστημάτων.

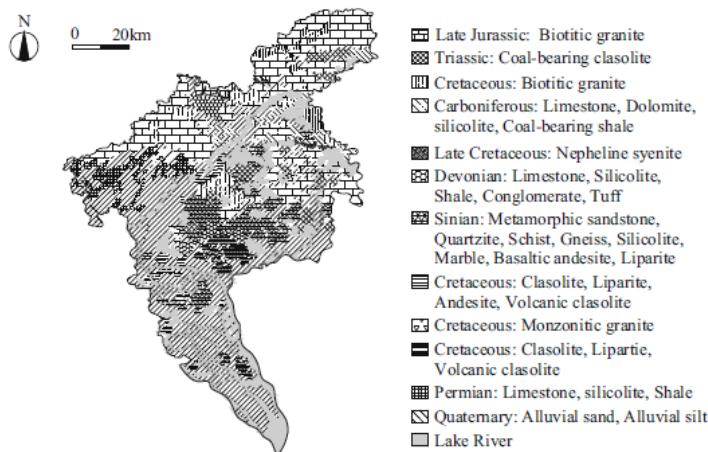
Αξίζει να σημειωθεί ότι η αποστράγγιση μπορεί πολλές φορές να έχει μη επιθυμητά αποτελέσματα προκαλώντας:

- εδαφικές καθιζήσεις
- ανάπτυξη καταβοθρών
- εξάντληση των υπόγειων υδάτων ή τον επιφανειακών αποθεμάτων
- εισροή θαλασσινού νερού
- εκτεταμένη μόλυνση των υδάτων και του περιβάλλοντος

Οδική σήραγγα στην Γκουανζού της Κίνας

Στην περιοχή *Γκουανζού της Κίνας* τον Ιούνιο του 1997 ξεκίνησε η κατασκευή μητροπολιτικής σήραγγας.. Ένα μεγάλο πρόβλημα της σήραγγας αυτής ήταν η περίπλοκη καρστική γεωλογία που αντιμετώπισε. Συγκεκριμένα παρατηρήθηκαν πτώσεις της οροφής και των πλευρών καρστικών σπήλαιων, λόγω της ενόχλησής τους κατά την εκσκαφή, γεγονός που μπορούσε να οδηγήσει σε καθιζήσεις και κινδύνους στα κοντινά κτίρια. Ένα παράδειγμα είναι αυτό της κατάρρευσης του μετώπου στην γραμμή 7, λόγω της χρήσης εκτίναξης κατά την κατασκευή της σήραγγας. Το γεγονός αυτό έγινε το 2013 και προκάλεσε την εμφάνιση μίας καταβόθρας έκτασης 690m² και την κατάρρευση 2 κτιρίων που βρίσκονταν κοντά.

Συγκεκριμένα, για την γραμμή 7 της σήραγγας, κατασκευάστηκε ένα σύστημα δεδομένων που συγκέντρωνε πληροφορίες για τις γεωλογικές συνθήκες της περιοχής, όπως την κατασκευή ενός γεωλογικού χάρτη, με τα ενεργά ρήγματα της περιοχής και την τεκτονική της. Η έρευνα πεδίου της γραμμής αυτής περιελάμβανε πηγάδια, καταβόθρες και μετρήσεις στάθμης του υπόγειου νερού με σκοπό την πιο λεπτομερή περιγραφή των γεωλογικών συνθηκών της περιοχής.

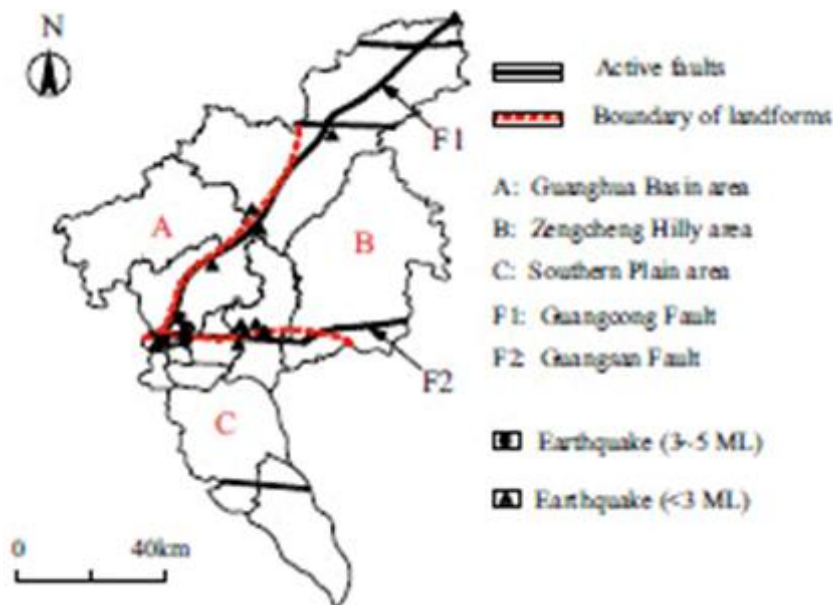


Εικόνα 4.3: Η στρωματογραφία της Γκουανζού. (Guangzhou Municipal Land Resources and Housing Administrative Bureau 2015)

Η στρωματογραφία της περιοχής απεικονίζεται στον χάρτη της εικόνας 4.3. Αποτελείται από 12 τύπους πετρωμάτων που οι ηλικίες τους κυμαίνονται από την

Προτεροζωική έως Καινοζωική εποχή. Συγκεκριμένα χαρακτηρίζεται από βιοτιτικούς γρανίτες, μονζονιτικούς γρανίτες, ασβεστολίθους, δολομίτες, συηνίτες, σχιστολίθους, χαλαζίτες, γενέσιους, ηφαιστειακή τέφρα. Τα ανθρακικά στρώματα βρίσκονται κυρίως στα βόρεια και αποτελούνται από ασβεστολίθους, δολομίτες, αργιλικούς σχιστολίθους.

Η τεκτονική της περιοχής αποτελεί τμήμα του συστήματος πτύχωσης της εποχής Α. Παλαιοζωικού έως Μέσου Τριαδικού. Όπως φαίνεται στην εικόνα 4.4, οι τεκτονικές δομές της Γκουανζού οριοθετούνται από 2 ενεργά κανονικά ρήγματα, το Γκουανγκόνγκ και Γκουανσάν. Η καρστική γεωλογία της περιοχής περιλαμβάνει καρστικούς αγωγούς, σπήλαια, πηγές και αναπτύσσεται κυρίως στην λεκάνη Γκουανγκούα. Ο αποσαθρωμένος ασβεστόλιθος σε συνδυασμό με ένα θερμό κλίμα και τεκτονικές διεργασίες αποτέλεσαν ιδανικές συνθήκες για την δημιουργία καρστικών σπηλαιών. Η υπόγεια ροή νερού και η τεκτονική επιταχύνουν την διαδικασία καρστικής διάλυσης και έτσι οι σχισμές του ασβεστολίθου σταδιακά αναπτύσσονται και δημιουργούνται καρστικά σπήλαια. Η διατάραξη των στρωμάτων και η αφυδάτωση κατά την κατασκευή της σήραγγας μπορεί να προκαλέσει κατάρρευση των καρστικών σπηλαιών και διείσδυση νερού.



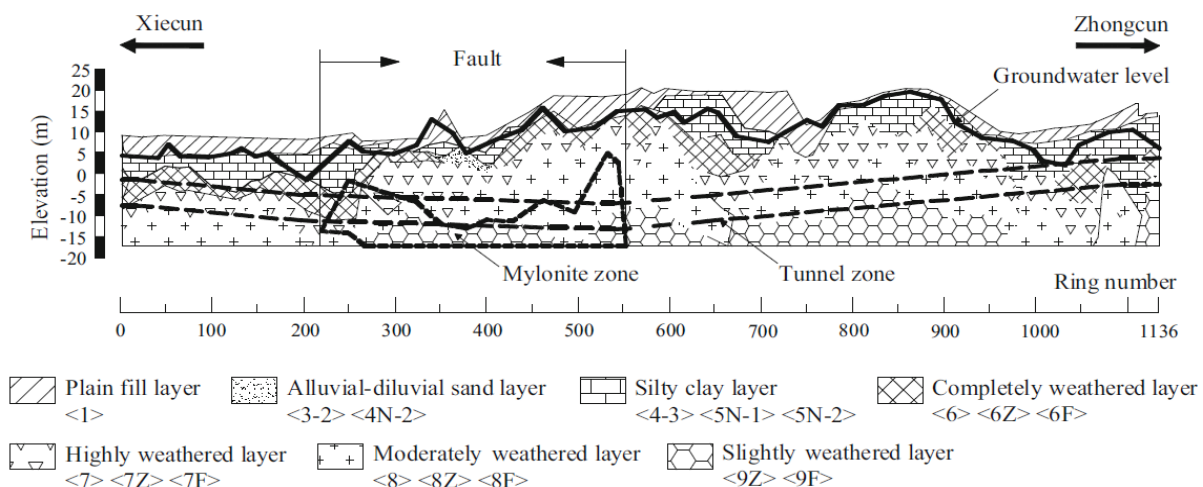
Εικόνα 4.4: Η τεκτονική της Γκουανζού. (Guangzhou Municipal Land Resources and Housing Administrative Bureau 2015)

Το καρστικό νερό της περιοχής είναι κατανεμημένο στην λεκάνη Γκουαγκούα και έχει παρατηρηθεί ότι η ποσότητά του μπορεί να εξαρτάται στον βαθμό ανάπτυξης του καρστικού σπηλαιού.

Σύμφωνα με την στρωματογραφία της περιοχής παρατηρείται γενικά μια ενότητα ανώτερων μαλακών στρωμάτων και μία κατώτερων σκληρότερων πετρωμάτων. Επομένως πρόκειται για μία εκσκαφή με μέτωπο που αποτελείται από μία μαλακή στρώση στην κορυφή και μία πιο σκληρή στην βάση.

Παρόλα αυτά τα μεταβαλλόμενα όρια των στρωμάτων κάνουν την επιλογή του τύπου TBM δυσκολότερη. Πιο συγκεκριμένα το σχήμα 4.14 απεικονίζει παραπάνω από δύο διαφορετικά στρώματα, με διαφορετικά γεωλογικά χαρακτηριστικά, τα οποία πιθανόν να συναντηθούν κατά την διάνοιξη του μετώπου. Με την διάνοιξη με ασπίδα σε αυτές της ενότητες ανώτερων μαλακών και κατώτερων σκληρών πετρωμάτων, παρατηρείται μία φθορά των κοπτικών άκρων, μειώνοντας την απόδοση του μηχανήματος και προκαλώντας καθυστέρηση στην όλη διαδικασία.

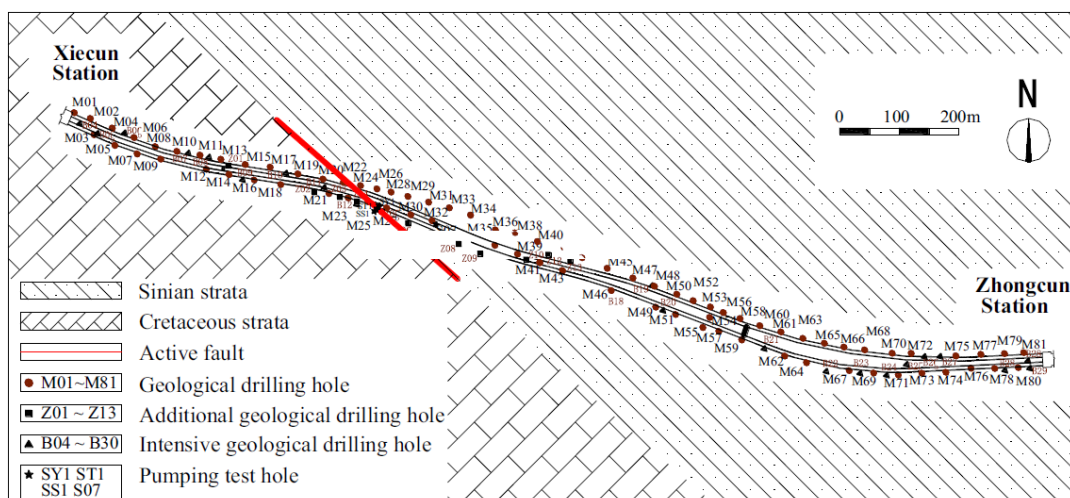
Επιπλέον στην περιοχή της εκσκαφής παρατηρούνται διάσπαρτα κομμάτια αποσαθρωμένου γρανίτη. Λόγω χημικής αποσάθρωσης τα κομμάτια αυτά στρογγυλεύονται και καλύπτονται από υλικά αποσάθρωσης δημιουργώντας ογκόλιθους γρανίτη. Παρόλα αυτά οι ογκόλιθοι αυτοί δύσκολα παρατηρούνται κατά τις γεωτρήσεις, λόγω του πολύ μικρότερου μεγέθους τους σε σχέση με τις οπές των διατρήσεων, με αποτέλεσμα να δημιουργούν προβλήματα στα κοπτικά άκρα και στην κεφαλή κοπής, όταν το TBM διαπερνά μαλακά υλικά και ξαφνικά τους συναντά.



Σχήμα 4.14: Κατακόρυφη κατανομή των στρωμάτων στην γραμμή 7 της σήραγγας Γκουανζού (Guangzhou Municipal Land Resources and Housing Administrative Bureau 2015)

Στην γραμμή 7 κατασκευάστηκε έναν διώροφος σταθμός με βόρεια και νότια σήραγγες μήκους 1,6 χιλιομέτρων. Χρησιμοποιήθηκαν δύο TBM ασπίδας εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης για διάνοιξη διαμέτρου 6μέτρων. Η εικόνα 4.5 απεικονίζει την κατανομή των γεωτρήσεων και των δοκιμών άντλησης κατά την

Εάν παρατηρηθεί ότι το πιεζομετρικό επίπεδο είναι υψηλό κατά την διάρκεια της διάνοιξης, τότε η μείωσή της στάθμης του θα ήταν απαραίτητη για την αποφυγή τυχών προβλημάτων. Ωστόσο η παρατεταμένη αποστράγγιση του νερού μπορεί να προκαλέσει καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους, ενώ η παρουσία κενών ανάμεσα



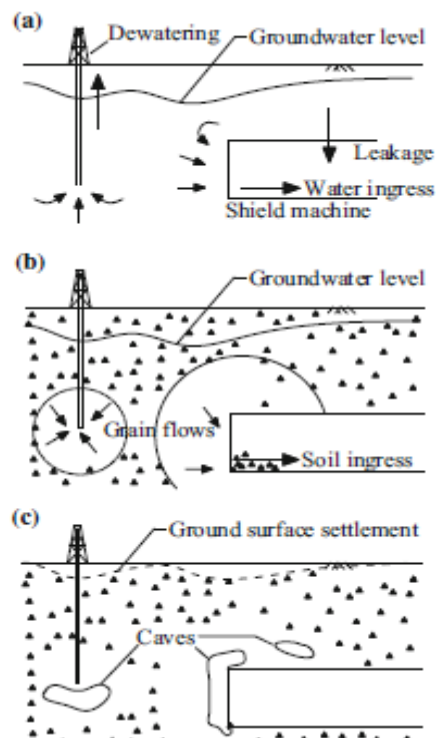
Εικόνα 4.5: Κατανομή των γεωτρήσεων και των δοκιμών άντλησης στην γραμμή 7 της σήραγγας Γκουανζού. (Guangzhou Municipal Land Resources and Housing Administrative Bureau 2015)

στα τμήματα της διάνοιξης μπορεί να προκαλέσει την εισροή του.

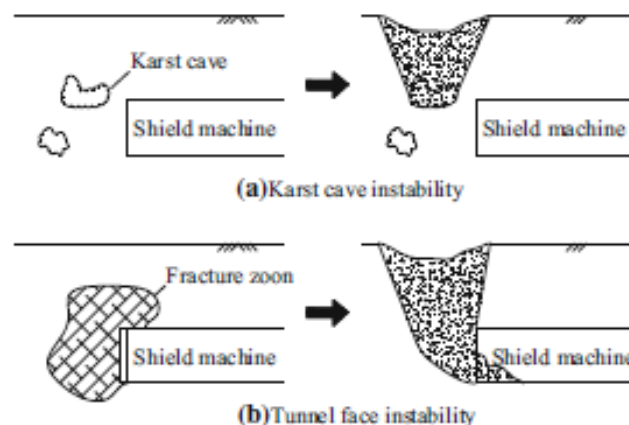
Υπάρχουν δύο τρόποι εισροής του νερού σε μια σήραγγα με ασπίδα. Το ένα είναι ένα ασταθές μέτωπο λόγω της ανεπαρκούς προετοιμασίας των υλικών εκσκαφής, στον θάλαμο εκσκαφής, ενώ το άλλο είναι τα κενά ανάμεσα σε τμήματα που έχουν ήδη ενεματωθεί. Αυτή η απώλεια νερού με την αποστράγγιση μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την απότομη μείωση του υδροφόρου, μεταβάλλοντας τις γειτονικές τάσεις, λόγω της μείωσης της πίεσης πόρων, προκαλώντας συμπίεση και τελικά καθίζηση του εδάφους. Όσο η κατασκευή, η αποστράγγιση και η απώλεια του νερού συνεχίζονται, τόσο τα μόρια του εδάφους θα μπορούν να αποπλυθούν με τα ρεύματα του νερού και να οδηγήσουν σε μια μορφή «λασποροής». Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα να σχηματίζονται γειτονικά σπήλαια και κοιλότητες. Ως επακόλουθο αυτή η ανάπτυξη των κενών μπορεί να οδηγήσει σε κατάρρευσή τους και επομένως

στην δημιουργία νέων καθιζήσεων που μπορεί ακόμη να μεταβάλλουν και την ευθυγράμμιση της σήραγγας.

Επομένως σαν συμπέρασμα, η εισροή του νερού σε συνδυασμό με την εσωτερική διάβρωση, μπορεί να επηρεάσει όχι μόνο την ασπίδα της σήραγγας αλλά και να προκαλέσει την εμφάνιση καθιζήσεων και καταβοθρών.



Σχήμα 4.15: Η διάβρωση του εδάφους λόγω της αποστράγγισης, της διαρροής και της εισροής νερού κατά την διάνοιξη της σήραγγας (Guangzhou Municipal Land Resources and Housing Administrative Bureau 2015)



Σχήμα 4.16: Καταβόθρες που προκλήθηκαν από την αστάθεια καρστικών σπηλίων και του μετώπου της σήραγγας. (Guangzhou Municipal Land Resources and Housing Administrative Bureau 2015)

Στην Βοσνία-Ερζεγοβίνη κατασκευάστηκε σήραγγα μήκους 15,6 χιλιομέτρων με όνομα **Fatnica—Bileca**. Η σήραγγα βρισκόταν μεταξύ της πόλης Fatnica, η οποία ήταν προσωρινά πλημμυρισμένη και μίας από της μεγαλύτερες ζώνες πηγών στο εσωτερικό του Διναρικού καρστ. Αποτέλεσε μια από τις πιο περίπλοκες σήραγγες σε καρστικοποιημένα πετρώματα. Η σήραγγα τοποθετούνταν στην μεγαλύτερη υπόγεια ζώνη ροής με περιεκτικότητα 300 m³/s την περίοδο των βροχοπτώσεων. Αυτό το νερό προκαλούσε πλημμύρες στο μεσαίο τμήμα της ήδη διανοιγμένης σήραγγας. Η είσοδος της σήραγγας, τοποθετήθηκε στην υποβυθισμένη ζώνη με περιεκτικότητα 100 m³/s, η οποία για ένα διάστημα τουλάχιστον 200 ημερών βρίσκεται κάτω από το νερό πλημμύρων. 10 κοιλάτες, οι περισσότερες πληρωμένες με άργιλο, καθυστέρησαν την εκσκαφή. Περνώντας μέσα από 8 κοιλάτες, σε 70 μόνο μέτρα, κρίθηκε απαραίτητη η διαχείριση της κατάστασης, ωστόσο και χρονοφόρα. Μετά από έντονη βροχόπτωση ο υδροφορέας υψώνεται πάνω από το αναντη τμήμα της σήραγγας. Κατά την εκσκαφή αυτός ο τομέας ήταν πλημμυρισμένος κατά μέσο όρο 120 μέρες ετησίως.

4.3 ΑΠΟΦΥΓΗ ΚΑΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΩΝ ΚΑΡΣΤΙΚΩΝ ΚΕΝΩΝ

Η παρουσία καρστ απαιτεί μια συγκεκριμένη αντιμετώπιση τόσο πριν όσο και κατά την διάρκεια της διάνοιξης της σήραγγας, καθώς μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα, όπως αστάθεια των τοιχωμάτων της, του μετώπου της, των γύρω πετρωμάτων ή και απότομες εισροές νερού. Γι' αυτό τον λόγο έχουν βρεθεί κάποιες μέθοδοι προκειμένου τα καρστικά κενά να μην αποτελούν εμπόδιο στην υλοποίηση του έργου.

1. *Η ενεμάτωση για την βελτίωση της υδατοστεγανότητας και της στιφρότητας του στρώματος:* Είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος μείωσης της διαπερατότητας του εδάφους και σκλήρυνσης του γύρω πετρώματος. Κατά την διάρκεια της κατασκευής σήραγγας, είναι απαραίτητη η ενεμάτωση ανάμεσα στο περιβάλλον πέτρωμα και στα τοιχώματα της σήραγγας με την χρήση σκυροδέματος έτσι ώστε να γεμίσουν τυχόν κενά ανάμεσά τους. Η άλλη μέθοδος με την οποία η ενεμάτωση γίνεται μπροστά από την ασπίδα, ονομάζεται προ-ενεμάτωση. Από την στιγμή που τα πετρώματα υψηλού

πορώδους όπως τα καρστικά επιτρέπουν την εισροή νερού και μετέπειτα την κατάρρευση του μετώπου, η προενεμάτωση είναι μια διαδικασία που μπορεί να βοηθήσει στην αποφυγή καθυστέρησης του έργου, σκληραίνοντας το πέτρωμα και μειώνοντας την περατότητά του. Η ενεμάτωση λοιπόν αποτρέπει τον σχηματισμό καταβοθρών, καθιζήσεων και εισροών νερού.

2. *Ψύξη εδάφους*: Η τεχνική αυτή βασίζεται στο πάγωμα του νερού κορεσμένου εδάφους και εφαρμόζεται κυρίως για ρηχές σήραγγες, όπου είναι δυνατή η εργασία από την επιφάνεια. Η ψύξη μπορεί να επιτευχθεί με την χρήση φορητής μονάδας ψύξης ή υγρού αζώτου. Τα αποτελέσματά της επηρεάζονται από την διεύθυνση της οπής, ενώ το μήκος της πρέπει να είναι μικρό. Αυτή η μέθοδος επίσης απαιτεί την τοποθέτηση της τελικής επένδυσης πριν την απόψυξη του εδάφους.
3. *Εκτοξευμένο σκυρόδεμα*: Είναι η κατάλληλη μέθοδος για μη συνεκτικά εδάφη, όπου λόγω της υψηλής πίεσης του σκυροδέματος, θρυμματίζει το αρχικό έδαφος και το αντικαθιστά με μία μίξη από σκυρόδεμα και εδαφικό υλικό. Ωστόσο λόγω του περιορισμένου χώρου στο εσωτερικό της ασπίδας, την ανάγκη για συνεχή εκκαθάριση της κεφαλής του TBM και τον κίνδυνο τσιμέντωσης της ασπίδας, μετατρέπουν την μέθοδο σε πολλή σπάνια.
4. *Αποστράγγιση*: Σε περιπτώσεις στις οποίες η σήραγγα διέρχεται από ζώνες που ρέει νερό, κατασκευάζεται σύστημα αποστράγγισης για την μείωση της υδροστατικής πίεσης. Η τεχνική αυτή επιτρέπει την μείωση της πίεσης του νερού και παράλληλα την βελτίωση της ευστάθειας των τοιχωμάτων και του μετώπου.
5. *Χαλύβδινη ομπρέλα ή δοκοί προπορείας*: Η χρήση δοκών προπορείας είναι μια μέθοδος η οποία μπορεί να γεφυρώσει την κοιλότητα. Αυτές οι δοκοί έχουν έναν τελείως διαφορετικό ρόλο από αυτές που χρησιμοποιούνται για την προυποστήριξη του μετώπου σε συμπίεστό έδαφος. Η λειτουργία τους έχει ως σκοπό να δημιουργήσει μια στέγη επάνω από την σήραγγα μέσα από την οποία τα αδύναμο υλικό πλήρωσης δεν μπορεί να περάσει. Ανάλογα με τον όγκο του υλικού που πρέπει να υποστηριχθεί οι δοκοί πρέπει να είναι λεπτές και τοποθετημένες στενά μεταξύ τους. Επιπλέον είναι απαραίτητο να είναι μακριές ώστε τα άκρα τους να μπορούν σίγουρα να εφαρμόσουν σταθερά στον καλό ασβεστόλιθο. Δεν χρειάζεται ωστόσο να κατασκευαστεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα υποστήριξης, με μία εκτεταμένη ομπρέλα

προπορείας, όπως στα συμπιεστά εδάφη. Οι σωλήνες της ομπρέλας αυτής τοποθετούνται στο μέτωπο της σήραγγας με κλίση 5° - 10° (από οριζόντια θέση) με τέτοιο τρόπο ώστε να σχηματίζουν μία ομπρέλα σχήματος κωνικού και μήκους 15 μέτρων. Παρόλα αυτά εάν η δειγματοληψία εντοπίσει ένα σημαντικό μεγέθους καρστικό έγκοιλο, τότε η εγκατάσταση ομπρέλας προπορείας θα ήταν απαραίτητη.

6. *Παρακαμπτήρια σήραγγα:* Η κατασκευή μίας τέτοιας σήραγγας θεωρήθηκε ιδανική για την αποφυγή τυχών καρστικών κενών και έγκοιλων. Τα gripper TBM μπορούν να θεωρηθούν κατάλληλα για να βρεθεί η κοιλότητα και να πληρωθεί με το κατάλληλο υλικό. Η εκσκαφή μιας παρακαμπτήριας σήραγγας μπορεί να γίνει με την χρήση μηχανήματος ανατίναξης ή κοπής βράχου, αφού σίγουρα υπάρχει ο κατάλληλος χώρος για την κινητοποίησή του. Ωστόσο η παρακαμπτήρια σήραγγα θεωρείται ένα μια λύση που σίγουρα καθυστερεί την περάτωση του κυρίως έργου και αυξάνει το κόστος του.
7. *Διατρήσεις ανίχνευσης και παρακολούθησης:* Με την χρήση της μεθόδου αυτής ελέγχεται και παρακολουθείται η γύρω περιοχή των πετρωμάτων πριν και κατά την διάρκεια της κατασκευής.
8. *Βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του κοπτικού άκρου του TBM*
9. *Η έγχυση πολφού-μπεντονίτη ή αφρού στον θάλαμο της κεφαλής.*

Τα TBM ασπίδας εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης EPB, προσφέρουν υποστήριξη στο μέτωπο χρησιμοποιώντας το εκσκαφέν υλικό. Αυτό πρέπει να είναι εύπλαστο, ενώ όπου χρειάζεται προστίθενται χημικά πρόσθετα. Η χρήση πολφού-μπεντονίτη και αφρού μπορεί να βελτιώσει τις ιδιότητες του εδάφους, ασκώντας πίεση επί του μετώπου

Επομένως η αντιμετώπιση ενός καρστικού κενού κατά την κατασκευή μιας σήραγγας αποτελεί πρόκληση. Μπορεί να αντιμετωπιστεί με την γεφύρωση ή την πλήρωση των κοιλοτήτων, εάν αυτές είναι κενές, με σταθεροποίηση και ενεμάτωση των μαλακών υλικών πλήρωσης και στην συνέχεια την διάνοιξη μέσα από αυτά ή τέλος ελέγχοντας την εισροή λάσπης ή υπόγειου νερού πριν το μέτωπο της σήραγγας φτάσει την κοιλότητα. (Marinos 2001, in Beck, et al, 2001).

Πίνακας 4.2: Τρόποι πρόληψης και αντιμετώπισης καρστικών κενών

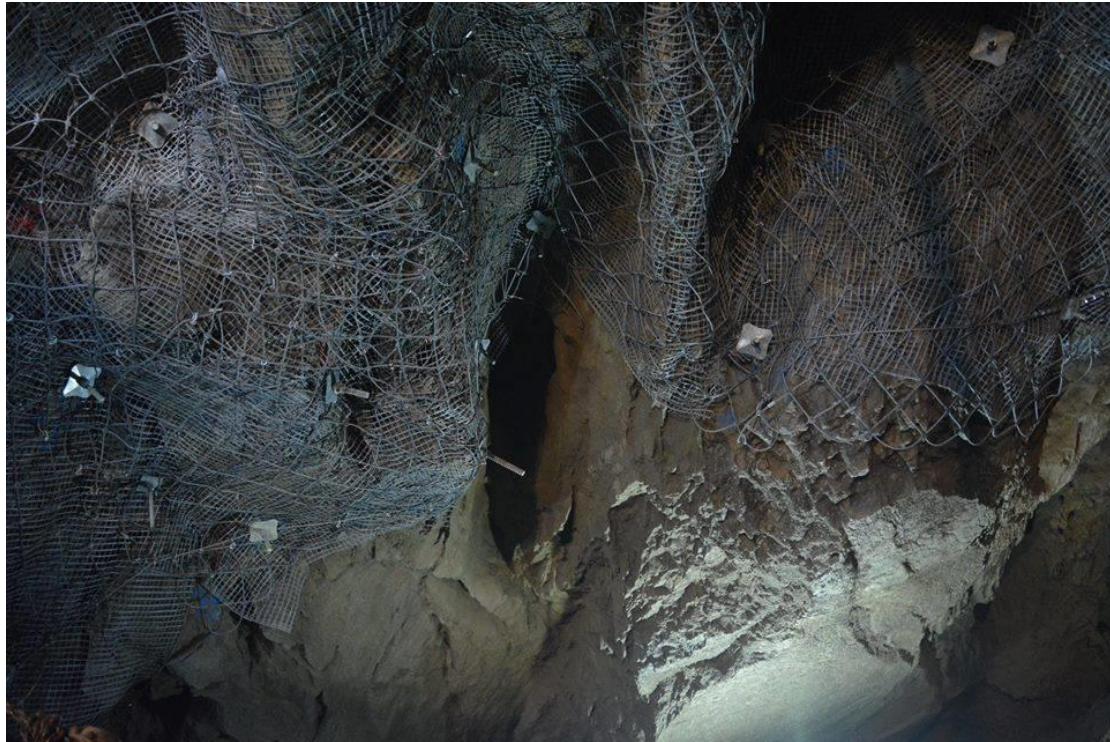
Τεχνολογία		Έλεγχος ευστάθειας τοιχωμάτων σήραγγας	Έλεγχος της εισόδου νερού	Έλεγχος της ευστάθειας μετώπου της σήραγγας	Έλεγχος τοπικών ασταθειών της βραχώδους μάζας
Βελτίωση της βραχώδους μάζας	Ενεμάτωση	Παρέμβαση γύρω από τα τοιχώματα της και πίσω από το μέτωπο	Παρέμβαση γύρω από τα τοιχώματα της και πίσω από το μέτωπο και στον εσωτερικό πυρήνα	Παρέμβαση γύρω από τα τοιχώματα της πίσω από το μέτωπο και στον εσωτερικό πυρήνα	
	Ψύξη εδάφους	Παρέμβαση γύρω από τα τοιχώματα της το μέτωπο και στον εσωτερικό πυρήνα	Παρέμβαση γύρω από τα τοιχώματα της και πίσω από το μέτωπο και στον εσωτερικό πυρήνα	Παρέμβαση γύρω από τα τοιχώματα της πίσω από το μέτωπο και στον εσωτερικό πυρήνα	
	Πολφός μπετονίτης-αφρός	Παρέμβαση γύρω από τα τοιχώματα της το μέτωπο	Παρέμβαση γύρω από τα τοιχώματα της το μέτωπο	Παρέμβαση γύρω από τα τοιχώματα της το μέτωπο	
Ενίσχυση της βραχώδους μάζας	Με χαλύβδινα στοιχεία	Ακτινωτή παρέμβαση πίσω από το μέτωπο			Τοπικές ή συστηματικές παρεμβάσεις
	Με σωλήνες από ίνες υάλου			Παρέμβαση από κοντινές σήραγγες, από την επιφάνεια ή από δοκιμαστική διάτρηση	
Προυποστήριξη	Δοκοί προπορείας ή χαλύβδινη ομπρέλα	Παρέμβαση γύρω από τα τοιχώματα της και το μέτωπο			
	Κολώνες εκτοξευμένου σκυροδέματος	Παρέμβαση γύρω από τα τοιχώματα της και το μέτωπο		Παρέμβαση γύρω από τα τοιχώματα της το μέτωπο	
Αποστράγγιση	Οπές ή σύστημα αποχέτευσης		Παρέμβαση γύρω από τα τοιχώματα της και πίσω από το μέτωπο		
Παρακαμπτήρια σήραγγα					
Διατρήσεις ανίχνευσης και παρακολούθησης					

Η σήραγγα του **Αποσελέμη** διατρύει το Οροπέδιο προς τον ταμιευτήρα του φράγματος Αποσελέμη, το οποίο αποτελείται από ασβεστόλιθους της σειράς Τριπόλεως, λατυποπαγές από επώθηση,φυλλίτες σε εναλλαγές με χαλαζίτες και την σειρά των αυτοχθόνων ασβεστολίθων της Ιονίου ζώνης. Οι ενότητες είναι επωθημένες η μία πάνω στην άλλη με την παραπάνω σειρά. Οι ασβεστόλιθοι Τριπόλεως-Πίνδου είναι καρστικοποιημένοι και παρουσιάζουν έντονη περατότητα. Η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα είναι χαμηλή με αποτέλεσμα η σήραγγα να βρίσκεται στην ζώνη μεταβίβασης των υπόγειων νερών προς τον υδροφορέα συναντώντας μόνο νερά κατά την διάρκεια βροχοπτώσεων. Ωστόσο οι ποσότητες των υδάτων που κατεισδύουν δεν είναι μεγάλες αφού η σήραγγα κατασκευάζεται στα εξωτερικά τμήματα του βουνού. Επιπλέον η θέση της επαφής φυλλιτών και ασβεστολίθων Τριπόλεως όπου παρατηρήθηκαν επικρεμάμενοι ορίζοντες, θεωρείται ως μια ακόμη θέση που μπορεί να παρέχει μικρής ποσότητας νερά στην σήραγγα, γεγονός που έκρινε ακόμη πιο σημαντική την τοποθέτηση κατάλληλου αποστραγγιστικού συστήματος.

Για την εύρεση των πιθανών καρστικών αγωγών και κενών χρησιμοποιήθηκαν διατρήσεις προπορείας προκειμένου να αποφευχθεί η αιφνίδια εισροή νερού και η καθυστέρηση του έργου. Επιπλέον εφαρμόστηκαν γεωτρήσεις οι οποίες έδειξαν πως οι ασβεστόλιθοι Τριπόλεως είναι περισσότερο καρστικοποιημένοι, ενώ καταγράφηκε και η πιθανότητα εντοπισμού καρστικού σπηλαιού μεγέθους μεγαλύτερου της διαμέτρου της σήραγγας.

Μιας και η διάνοιξη της σήραγγας είναι μηχανοποιημένη , χρησιμοποιήθηκε TBM διπλής ασπίδας. Συγκεκριμένα για σταθερά πετρώματα το TBM μπορεί να δουλεύει με τα πέδιλα της πίσω ασπίδας και παράλληλα να γίνεται μόνιμη επένδυση της σήραγγας. Όταν πρόκειται ωστόσο για ασθενή πετρώματα η διπλή ασπίδα λειτουργεί ως μονή με λειτουργία που δεν είναι συνεχής και βασίζεται στην ώθηση των εμβόλων. Η διπλή ασπίδα έχει την ικανότητα να αντιμετωπίζει μικρές καρστικές κοιλότητες, χωρίς να υπάρξει προσωρινή υποστήριξη, αφού υπάρχει η στηριξη από την ασπίδα, αλλά με απλή πλήρωση των κενών με ισχνό σκυρόδεμα.. Επιπλέον το μηχάνημα της διπλής ασπίδας έχει την ικανότητα να αντιμετωπίζει και πληρωμένες με εδαφικό υλικό σπηλαιώσεις.

Το έργο του Αποσελέμη καθυστέρησε, λόγω της εμφάνισης μεγάλου σπηλαίου το οποίο δεν μπορούσε εύκολα να αντιμετωπιστεί. Έτσι το TBM σταμάτησε να λειτουργεί, το σπήλαιο υποστηρίχθηκε με πλέγματα αγκυρίων και εκτοξευμένο σκυρόδεμα, ενώ το έργο προσπάθησε να αντιμετωπιστεί με την κατασκευή μικρής στοάς παράκαμψης του μηχανήματος και με την γεφύρωση του σπηλαίου.



Εικόνα 4.6: Πλέγμα αγκυρίων κατά μήκος του καρστικού σπηλαίου του Αποσελέμη. (Πηγή: Σήραγγες στην Ελλάδα, γεωλογία σχεδιασμός, κατασκευή)

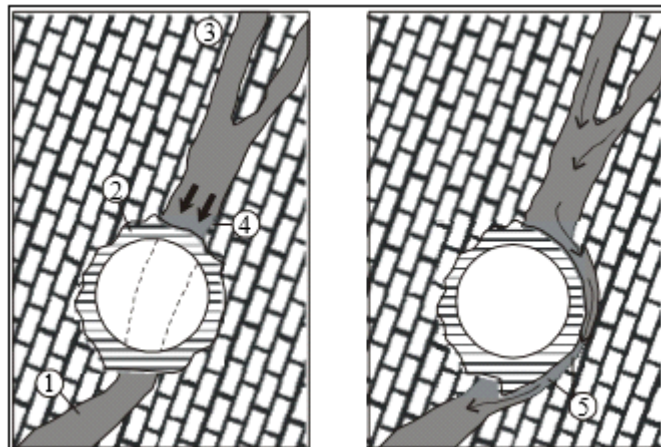
Στην βόρεια Ελλάδα κατασκευάστηκε μία σήραγγα, η σήραγγα της **Δωδώνης**, με μήκος 3,3 χιλιόμετρα και 12 μέτρα διάμετρο. Το περιβάλλον στο οποίο κατασκευάστηκε είναι ένας καλά ανεπτυγμένος στρωματώδης ασβεστόλιθος, με τοπική παρουσία αργίλου και πηλου, που παρουσιάζει καλή συμπεριφορά. Ωστόσο σε ορισμένα σημεία παρατηρήθηκαν σπασίματα, λόγω της αστάθειας πλήρωσης των καρστικών σπηλαίων. Επιπλέον δείγματα καρστικής διάλυσης παρατηρήθηκαν εξωτερικά, στην επιφάνεια του βουνού, τα οποία ωστόσο διαπεράστηκαν από την σήραγγα σε βάθος 100 μέτρα. Επομένως πρόκειται για μια ενεργή καρστική διάλυση στο εσωτερικό του ασβεστολίθου.

Σημειώθηκαν δύο σημαντικές καταρρεύσεις σχετικές με την παρουσία καταβοθρών στην επιφάνεια. Τα κενά ήταν γεμάτα με αργιλικό υλικό, κομμάτια σπασμένου πετρώματος, ενώ εμφάνιζαν και υγρασία. Η αρχική κατάρρευση είχε διάμετρο 1,5 μέτρα στην σήραγγα και 3 μέτρα στην επιφάνεια, οδηγώντας στην πτώση 1200m^3 υλικού στο εσωτερικό της σήραγγας.

Για να εντοπιστούν τα καρστικά έγκοιλα, τα κενά που ήταν εμπλουτισμένα με μαλακά και θρυμματισμένα υλικά και οι ζώνες ρωγμάτωσης, κρίθηκε απαραίτητη η δειγματοληψία στο μέτωπο της σήραγγας. Όπως σε όλα τα καρστικά κενά, λόγω του ασυνήθιστου και απροσδιόριστου σχήματος και θέσης των αδύναμων ζωνών, συνίσταται η διάτρηση τριών οπών από το μέτωπο σε θέσεις 10,12 και 2 βάση τους δείκτες του ρολογιού. Όταν εντοπιστηκε η αδύναμη ζώνη, τότε έπρεπε να κατασκευαστούν επιπλέον δειγματοληψίες για να προσδιοριστεί το μέγεθος και το σχήμα της ζώνης.

Ως γενικός κανόνας η ενεμάτωση του υλικού πλήρωσης της κοιλότητας, είναι η πρωταρχική μέθοδος συνεκτικοποίησης και ενίσχυσης του υλικού. Παρόλα αυτά η ενεμάτωση μπορεί να έχει αρνητικές επιπτώσεις ανάλογα με τις συνθήκες και τα χαρακτηριστικά του υλικού στο οποίο θα εφαρμοστεί.

Αντιμετωπίζοντας την περίπτωση ενός κατακόρυφου καρστικού αγωγού, που αποτελεί την πιο συνηθισμένη περίπτωση στην ζώνη μετάβασης του υδροφόρου, το νερό μπορεί απρόβλεπτα να ασκήσει πίεση στην σήραγγα. Προκειμένου να προληφθεί πιθανή καταστροφή, κρίνεται απαραίτητη η αποστράγγιση του αγωγού περιμετρικά της σήραγγας προς χαμηλότερα επίπεδα (Σχήμα 4.17).



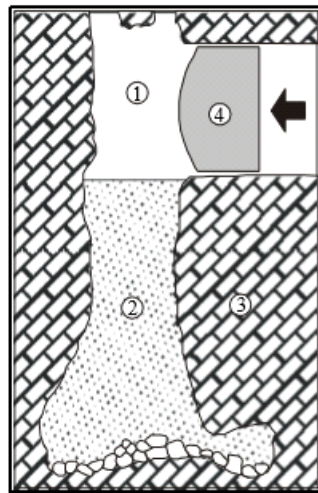
Σχήμα 4.17: Πέρασμα μέσα από μεγάλο καρστικό αγωγό με διάνοιξη (1) Καρστ, (2) Σήραγγα, (3) Στάθμη νερού στον αγωγό, (4) Επένδυση σήραγγας υπό την πίεση του νερού, (5) Αποστράγγιση γύρω από την σήραγγα. (Marinos P.G. 2001)

Ένα ακόμη παράδειγμα είναι αυτό της σήραγγας **Ucka** στην Κροατία, η οποία συνάντησε πολλές σπηλαιώδεις ζώνες. Ο P. Milanovic (2000) περιγράφει την διαδικασία που ακολουθήθηκε για την κατασκευή της σήραγγας κάτω από αυτές τις συνθήκες (Σχήμα 4.18).

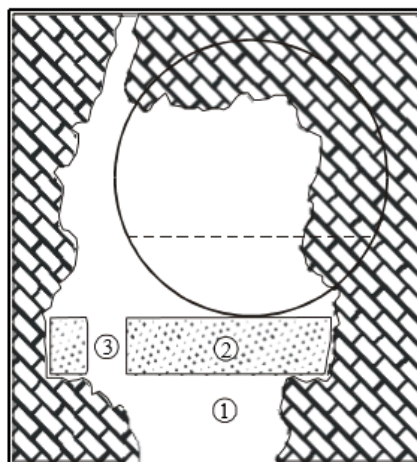
Το ολικό μήκος των καρστικών αγωγών είναι πάνω από 1,300 μέτρα. Η μεγαλύτερη σπηλιά είναι 175 μέτρα μήκος και 70 μέτρα πλάτος, ενώ η πιο κοντινή στην σήραγγα σπηλιά είναι 60 μέτρα μήκος, 40 μέτρα πλάτος και 55 μέτρα ύψος. Στα χαμηλότερα τμήματα του σπηλαιώδους συστήματος παρατηρείται μία διαρκής ροή υπόγειου νερού. Μετά από υψηλά ποσοστά καταιγίδων, η ροή αυξάνεται απότομα επηρεάζοντας αρνητικά τις συνθήκες κατασκευής. Από την στιγμή που η ευστάθεια της σήραγγας βρίσκεται σε κίνδυνο, χρειάζεται τεχνική υποστήριξη. Η ολική σύνδεση του σπήλαιου δεν μπορεί να διεξαχθεί, λόγω της συνεχούς ροής νερού. Η κατασκευές με την χρήση οπλισμένου σκυροδέματος απορρίφθηκαν, διότι αυτή θεωρήθηκε περίπλοκη και ακριβή λύση. Από την στιγμή που βαρύς μηχανικά εξοπλισμός δεν μπόρεσε να χρησιμοποιηθεί στον κενό χώρο του σπηλαίου, βρέθηκε μια πιο απλή λύση για την υποστήριξη της ασταθούς βραχώδους μάζας ανάμεσα στην σήραγγα και στην οροφή του σπήλαιου. Η οροφή υποστηρίχθηκε με συμπαγή και σταθεροποιημένη πλήρωση λεπτόκοκκου αδρανούς ασβεστόλιθου, τοπικά ενισχυμένου με τσιμέντο. Η ενισχυμένη ζώνη σχηματίζει ένα τσιμεντένιο στρώμα γύρω από τον αδρανή ασβεστόλιθο και πάνω από τα τεμάχια ασβεστόλιθου. Το συνολικό πάχος αυτής της ζώνης είναι 1 μέτρο. Ο χώρος ανάμεσα στον ενισχυμένο αδρανή και στην οροφή του σπηλαίου πλήρώθηκε με σκυρόδεμα. Κατά μήκος

ολόκληρης της ζώνης επαφής μεταξύ του σκυροδέματος και της σπηλαιοορφής, τοποθετήθηκαν αγκύρια 24 χιλιοστών. Η κατασκευή των δομών υποστήριξης της σήραγγας ολοκληρώθηκε χωρίς την χρήση ενέματος.

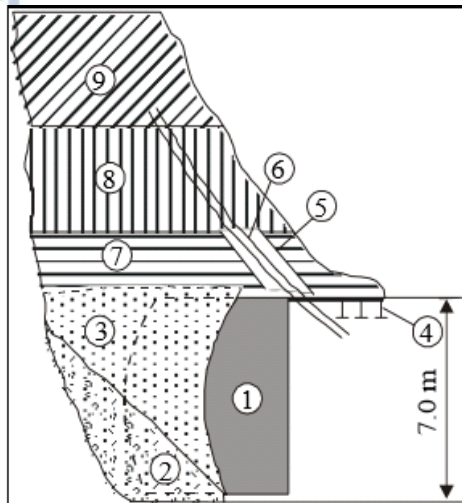
Όταν η διάνοιξη γίνεται με TBM, η τοπική αλλαγή του άξονα της σήραγγας με σκοπό την αποφυγή των καρστικών κενών δεν είναι η καταλληλότερη λύση γι' αυτό και συνήθως γίνονται προσπάθειες πλήρωσης του κενού ή γεφύρωσής του (Σχήμα 4.19, Σχήμα 4.20). Εάν η πλήρωση του καρστικού έγκοιλου πρέπει να διεξαχθεί μέσα από την σήραγγα, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή προκειμένου οι διαδικασίες σκυροδέτησης να μην σταθούν εμπόδιο στην διάνοιξη.



Σχήμα 4.18: Πλήρωση σήραγγας με σκυρόδεμα για την διάνοιξη με TBM (Milanovic,2000). (1) Σπήλαιο, (2) Τμήμα σπηλαίου πληρωμένο με σκυρόδεμα, (3) Ασβεστόλιθος, (4) TBM.

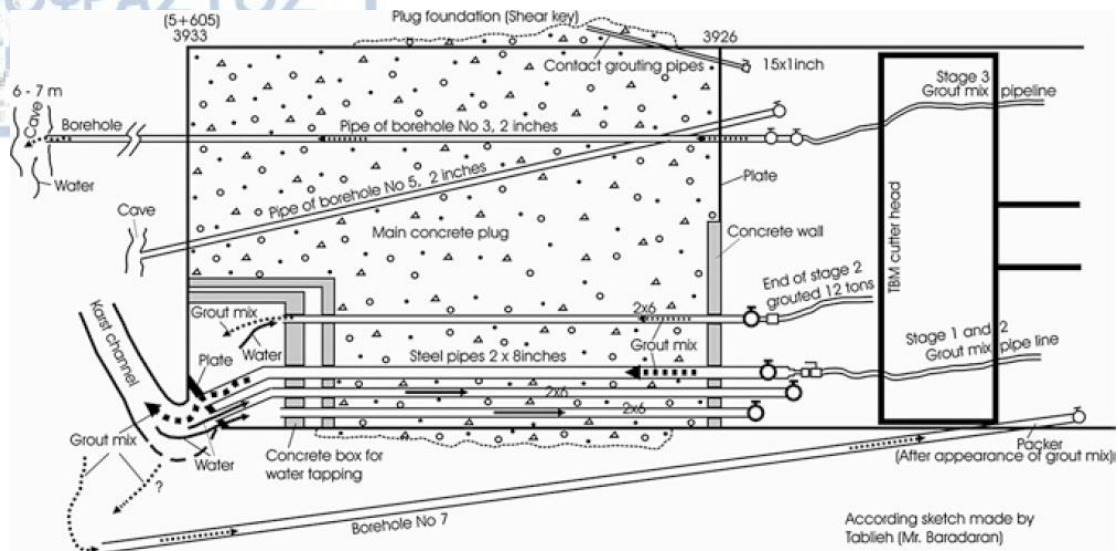


Σχήμα 4.19: Ανακατασκευή σήραγγας με γεφύρωση για την διάνοιξη με TBM (Milanovic,2000). (1) Σπήλαιο, (2) πλάκα σκυροδέματος, (3) σύστημα εξαερισμού-αποστράγγισης



Σχήμα 4.20: Πλήρωση ενός σπηλαίου από το εσωτερικό της σήραγγας (Milanovic, 2000). (1) TBM (2) αργιλικές αποθέσεις σπηλαίου, (3) άμμος, (4) Υποστήριξη σήραγγας, (5) άξονας, (6) σωλήνας συνδεδεμένος με την βαλβίδα σκυροδέματος, (7,8,9) στάδια σκυροδέτησης.

Στην περιοχή του Ιράν κατασκευάστηκε η σήραγγα **Kouhrang III Tunnel**, η οποία έχει μήκος 23χιλ. Κατασκευάστηκε σε καρστικοποιημένα πετρώματα και είχε σκοπό την μεταφορά νερό από τον ποταμό Karun στον Zayandeh. Περισσότερο από 70% της διαδρομής είναι τοποθετημένη σε καρστικοποιημένο ασβεστόλιθο και δολομίτη. Σε δύο τμήματα παρατηρήθηκαν πλημμύρες λόγω της υπόγειας ροής που ξεπέρασε τα 1,000 l/s. Η τεράστια υπόγεια ροή και οι πλημμύρες συνέβησαν πολλές φορές κατά την εκσκαφή του κύριου τομέα της σήραγγας. Μεγάλες εισροές νερού ξέπλυναν από κοιλότητες υλικά όπως άμμο και ιλύ σε ποσότητες πάνω από 1,000m³. Η περιοχή αυτή σταθεροποιήθηκε με την χρήση σκυροδέματος και μαζική έκχυση κονιάματος μπροστά από την κεφαλή του TBM με συνολική ενεμάτωση 446 τόνων στεγνού τσιμέντου.



Σχήμα 4.21: Η τεχνολογία σκυροδέτησης της μαζικής εισροής νερού μπροστά από την κεφαλή κοπής του TBM.(Milanovic P. 2001)

Σήραγγα Kastelec (Σλοβενία)

Η περιοχή κατασκευής της σήραγγας ανήκει σε μια ενότητα καρστ που ονομάζεται Rodgorje και αποτελείται από παλαιοκαινικούς και ηωκαινικούς ασβεστολίθους σε εναλλαγές με ηωκαινικό φλύσχη.

Κατά την κατασκευή του αριστερού τμήματος της σήραγγας αποκαλύφθηκε μια άγνωστη έως τότε σπηλιά πάνω από 500 μέτρα μήκος και 50 μέτρα βάθος. Το ανατολικό τμήμα της κατεβαίνει ομοιόμορφα και φτάνει στο χαμηλότερο σημείο πρόσβασής της υψόμετρου 315 μέτρων, 47 μέτρα δηλαδή κάτω από την βάση της σήραγγας. Το δυτικό κομμάτι ανεβαίνει ελαφρώς έτσι ώστε το τελικό σημείο να είναι σε υψόμετρο 356 μέτρα δηλαδή 6 μέτρα κάτω από την βάση της σήραγγας. Από την στιγμή που η σπηλιά βρίσκεται κάτω από την σήραγγα, ενισχύθηκε η οροφή της με την χρήση τσιμεντένιας πλάκας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΥ ΤΥΠΟΥ TBM (TUNNEL BORING MACHINE)

5.1 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ TBM - ΓΕΝΙΚΑ

1. Μηχανές χωρίς ασπίδα (Gripper TBM)

Πρόκειται για ένα TBM που είναι κατάλληλο για πιο ισχυρές βραχομάζες. Η ευστάθεια στο μέτωπο και στα μη υποστυλωμένα τοιχώματα της σήραγγας επιτυγχάνεται με προσωρινά μέσα υποστήριξης, όπως είναι το εκτοξευμένο σκυρόδεμα, οι κοχλίες και τα μεταλλικά πλαίσια. Είναι πιο οικονομικά από τα TBM με ασπίδα.

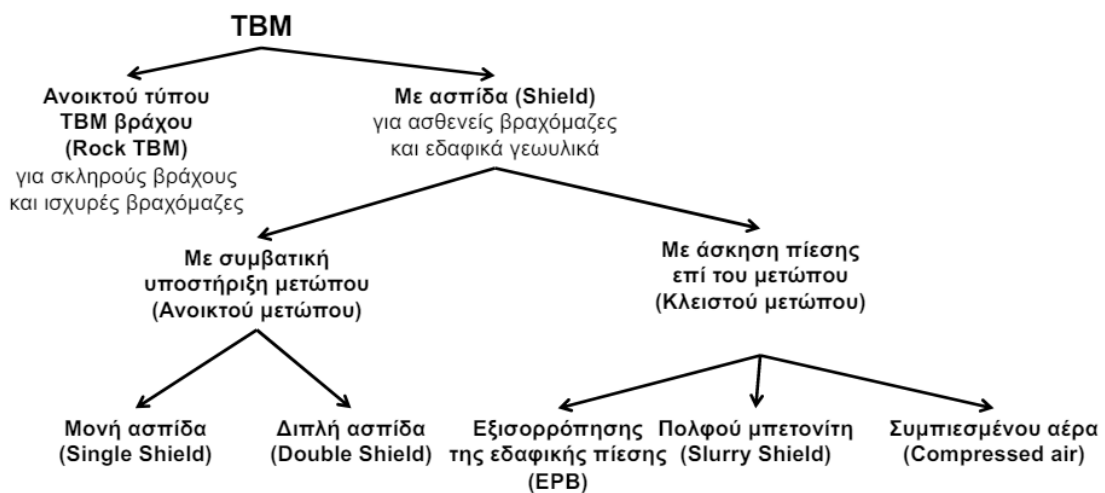
2. Μηχανές με ασπίδα (Shielded TBM)

Τα TBM αυτής της κατηγορίας παρέχουν προσωρινή στήριξη σε ασταθή εδάφη, στο μέτωπο και στα τοιχώματα της σήραγγας. Είναι ιδανικά για βραχομάζες μικρότερης αντοχής και εδαφικά υλικά. Συγκεκριμένα η βραχομάζα δεν μπορεί να παραλάβει τις δυνάμεις που ασκούνται από το TBM, γι αυτό τον λόγο αυτό διαθέτει την ασπίδα. Το μηχάνημα προωθείται με την πίεση που ασκούν τα έμβολα στα προκατασκευασμένα στοιχεία της τελικής επένδυσης της σήραγγας. Διακρίνονται στα TBM ανοιχτού μετώπου και κλειστού μετώπου

I. *Ανοιχτού μετώπου με ασπίδα (OFS):* Πρόκειται για μηχανήματα ολομέτωπης κοπής τα οποία παράλληλα τοποθετούν επένδυση από σκυρόδεμα στην σήραγγα. Ο τύπος αυτός χρησιμοποιείται κυρίως για βραχώδεις σχηματισμούς μέτριας ποιότητας, μαλακά πετρώματα και συμπαγείς εδαφικούς σχηματισμούς.. Η σήραγγα υποστηρίζεται με έναν δακτύλιο που σχηματίζεται από προκατασκευασμένα στοιχεία με οπλισμένο σκυρόδεμα και αυτοί μπορούν να αποτελέσουν την προσωρινή ή μόνιμη επένδυσή της.

II. *Κλειστού μετώπου:* Διακρίνεται σε μηχανήματα εξισορρόπησης εδαφικής πίεσης (EPB), Πολφού μπεντονίτη (Slurry Shield) και συμπιεσμένου αέρα (Compressed air). Το EPB είναι κατάλληλο για συνεκτικούς και μαλακούς εδαφικούς σχηματισμούς και μαλακά πετρώματα, ενώ οι τιμές υδροπερατότητας και εσωτερικής τριβής πρέπει να είναι χαμηλές. Το έδαφος πιέζεται μέσα από την σήραγγα,

μέσα από ένα ή περισσότερα ανοίγματα που βρίσκονται στο διάφραγμα πίεσης. Το εκσκαφέν υλικό πρέπει να είναι εύπλαστο και χρησιμοποιείται για την στήριξη του μετώπου. Χαρακτηριστικό του EPB είναι ότι επιτρέπει την διάνοιξη κοντά στην επιφάνεια του εδάφους χωρίς να προκαλεί εδαφικές διαταραχές. Σε αντίθεση με το EPB, το μηχάνημα πολφού μπετονίτη χρησιμοποιείται κυρίως για πιο αδρόκοκκους εδαφικούς σχηματισμούς(αμμοχάλικο>60%, ιλύς και άργιλος<10) με υψηλές διαπερατότητες($k>10^{-2}$). Συγκεκριμένα το έδαφος του μετώπου διαποτίζεται με πολφό, στερεοποιείται και στην συνέχεια υποστηρίζεται από την πίεση που ασκεί ο πολφός. Με αυτό τον τρόπο η πίεση του εδάφους και του νερού εξισορροπούνται.



Σχήμα 5.1 : Οι κατηγορίες του TBM. (Μαρίνος Β., Τεχνική Γεωλογία, Η' εξάμηνο τμήματος Γεωλογίας ΑΠΘ)

5.2: TBM ΙΔΑΝΙΚΑ ΓΙΑ ΚΑΡΣΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Ο ασβεστόλιθος γενικά παρουσιάζει μια καλή γεωτεχνική συμπεριφορά και οι συνθήκες του είναι ευνοϊκές για την διάνοιξη μιας σήραγγας. Η κατασκευή μιας

σήραγγας που αποτελείται από καρστικοποιημένα πετρώματα και επηρεάζεται από την παρουσία υδάτων μετεωρικών ή υπόγειων απαιτεί την επιλογή ενός συγκεκριμένου τύπου TBM. Βασική προϋπόθεση για την σωστή επιλογή του μηχανήματος, είναι η έγκαιρη αναγνώριση της κατάστασης που πρόκειται να παρουσιαστεί κατά την διάνοιξη της σήραγγας. Για να αποφευχθούν τυχόν εμπόδια είναι απαραίτητος ο εντοπισμός τόσο των γεωλογικών ερευνών πριν την διαδικασία διάνοιξης, όσο και κατά την διάρκειά της.

Η καρστικοποίηση και η παρουσία υδάτων μπορεί να είναι οι πιο περίπλοκες γεωλογικές συνθήκες για τον έγκαιρο προσχεδιασμό της εργασίας κατασκευής. Για την χρήση TBM σε καρστικές συνθήκες και σε συνθήκες όπου η παρουσία του νερού είναι σημαντική, υπάρχουν αρκετές παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη πριν την επιλογή του τύπου TBM. Πιο συγκεκριμένα, αυτές είναι:

- Ο βαθμός αποσάρθρωσης
- Η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα
- Οι γεωλογικές συνθήκες
- Ανάγκη επένδυσης ορισμένων τμημάτων
- Επιφανειακές καθιζήσεις
- Κόστος
- Οι συνθήκες της περιοχής

Με βάση αυτές τις συνθήκες επιλέγεται ο κατάλληλος τύπος μηχανήματος και μπορεί να βελτιστοποιηθεί ο σχεδιασμός του, ανάλογα με τις συνθήκες που θα συναντηθούν.

5.2.1 : TBM ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΤΥΠΟΥ

Το ανοιχτού τύπου TBM βασίζεται στις διαδικασίες της δειγματολήψιας και της προενεμάτωσης για να ληφθούν μέτρα ενάντια στις εισροές του νερού. Αφού το μηχανήμα είναι ανοιχτό, δεν υπάρχει αποτελεσματικός τρόπος να διατηρεί το επίπεδο του νερού στην ίδια θέση. Είναι λοιπόν απαραίτητος ο εντοπισμός και η διαχείριση

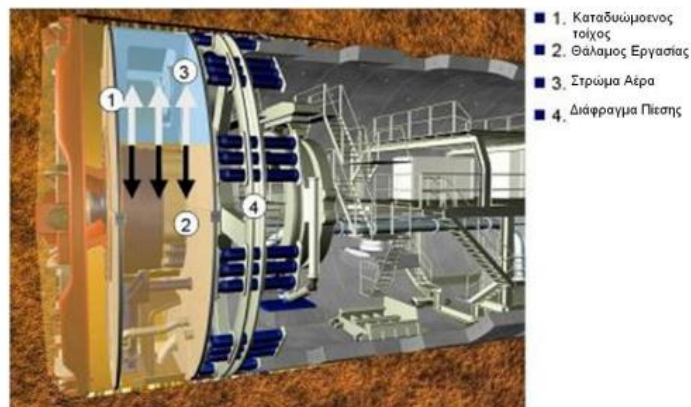
του νερού που εισρέει στις καρστικές ασυνέχειες πριν την διάτρησή τους, όπως επίσης και για οποιαδήποτε άλλες πιθανές εισροές που μπορεί να υπάρχουν.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, με τον κατάλληλο σχεδιασμό, το ανοιχτού τύπου TBM μπορεί να διανοίγει συνεχόμενα, παράλληλα με σημαντική εισροή νερού, χωρίς να παρουσιάζονται προβλήματα, ειδικά εάν το TBM είναι κατασκευασμένο για μεγάλες εισροές νερού. Για να γίνει οικονομικά εφικτή η διαδικασία συνεχόμενων δειγματοληπτικών γεωτρήσεων είναι απαραίτητο να ακολουθηθούν οι παρακάτω ενέργειες:

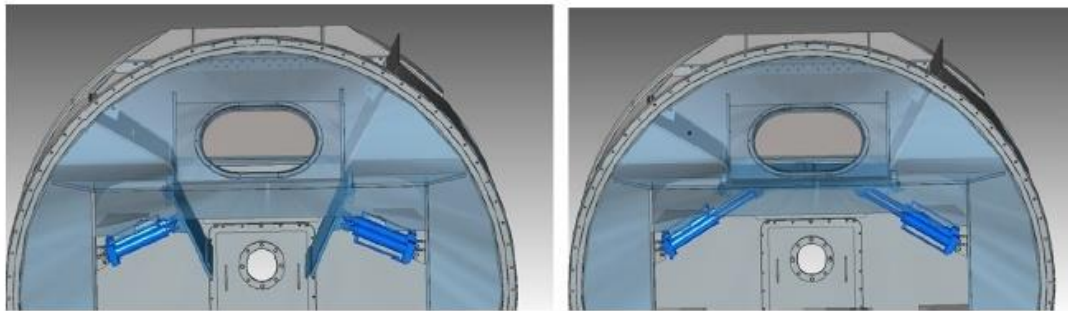
- Πολλαπλά τρυπάνια πετρωμάτων στον σχεδιασμό του TBM για πιο αποτελεσματικές δειγματοληψίες
- Βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του TBM για την δειγματοληψία
- Βελτιστοποίηση της διαδικασίας για να επιτραπεί η δειγματοληψία και η διάτρηση για την προ-ενεμάτωση κατά την διάρκεια του έργου
- Ανάλυση και αύξηση των προϊόντων των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων και των γεωφυσικών μεθόδων
- Διαθέσιμα υλικά ενεμάτωσης για ανεφοδιασμό

5.2.2: TBM ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ ΜΕ ΑΣΠΙΔΑ

Τα TBM με ασπίδα έχουν την δυνατότητα να σταματήσουν την εισροή νερού, κλείνοντας το κοπτικό και σφραγίζοντας άλλα σημεία διαρροής. Το γεγονός αυτό μπορεί να περιορίσει και να μειώσει τον αντίκτυπο πιθανής εισροής μεγάλου όγκου νερού.



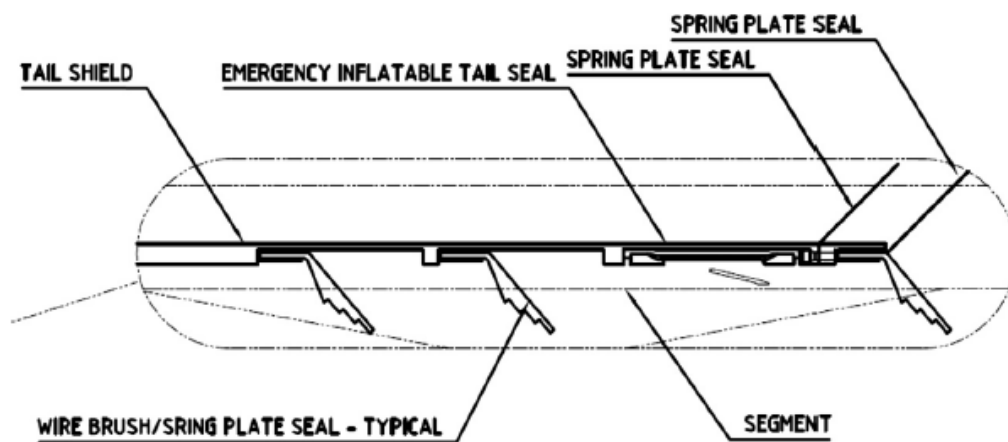
Εικόνα 5.1: Μέρη TBM διπλής ασπίδας. (Μαρίνος Β., Τεχνική Γεωλογία, Η' εξάμηνο τμήματος Γεωλογίας ΑΠΘ)



Εικόνα 5.2: Οι πύλες της κοπτικής κεφαλής για TBM μονής και διπλής ασπίδας. (Lok H. 2015)

Η συγκράτηση της πίεσης νερού είναι πιθανή τόσο για TBM μονής όσο και διπλής ασπίδας, σαν μια προσωρινή λύση που συγκρατεί το νερό ώστε να επιτραπεί η προ-ενεμάτωση πιο αποτελεσματικά πριν την έναρξη της εκσκαφής.

Τα συστήματα επισφράγισης μπορούν να αντέξουν πιέσεις έως και 12bar με το μηχάνημα να μετατρέπεται από ανοιχτό τύπο σε ολοκληρωτικά σφραγισμένο μέσα σε 3-5 λεπτά. Το σύστημα επισφράγισης για ένα TBM διπλής ασπίδας αποτελείται από



ανεπτυγμένο σύστημα σφραγισμάτων.

Σχήμα 5.2. : Είδη σφραγισμάτων του συστήματος επισφράγισης. (Lok H. 2015)

5.2.3: TBM ΜΙΚΤΟΥ ΤΥΠΟΥ

Αποτελούν TBM νέας γενιάς και πρόκειται για μηχανήματα που είναι σχεδιασμένα να διασχίζουν πετρώματα διαφορετικών γεωλογικών τύπων που υπό κανονικές συνθήκες θα χρειαζόνταν πολλαπλά μηχανήματα. Μπορούν να αλλάζουν από

συμπιεστό τύπο σε μη συμπιεστό και μπορούν να προσαρμοστούν απέναντι σε οποιαδήποτε απαίτηση για την κατασκευή της σήραγγας. Διακρίνονται σε τρία είδη: τα XRE (Crossover between Rock and EPB) που αποτελούν και τον πιο συνηθισμένος τύπο, τα XSE (Crossover between Slurry and EPB) και τα XRS (Crossover between Rock and Slurry).

Σήραγγα εκτροπής νερού στην Κουάλα Λουμπούρ της Μαλαισίας

Στην τοποθεσία της Κουάλα Λουμπούρ αντιμετώπιζαν το πρόβλημα συχνών πλημμυρών στην θέση του ποταμού Κλανγκ. Το γεγονός αυτό προκαλούσε προβλήματα όπως κυκλοφοριακή συμφόρηση και καταβύθιση αυτοκινήτων. Επιπλέον οι πρόσφατες κατασκευές στις όχθες του ποταμού έκανα αδύνατη την διεύρυνση των πλημμυρικών περιοχών. Επομένως θεωρήθηκε απαραίτητη η διαχείριση των πλημμύρων με την προώθηση του νερού προς ανώτερους ορίζοντες ή την εκτροπή του πριν φτάσει στην κρίσιμη περιοχή. Η διαχείριση αυτή μπορεί να αντιμετωπιστεί με την κατασκευή μίας σήραγγας 9 χιλ. η οποία θα αποθηκεύει και θα εκτρέπει το νερό των πλημμυρών. Η εκτροπή του νερού γίνεται στην συμβολή των ποταμών Κλανγκ και Αμπανγκ σε μία τεχνητή λίμνη. Από εκεί το νερό περνώντας μέσα από μια σήραγγα εισέρχεται μέσα στην λίμνη Ταμάν Ντεσά από εκεί μέσω ενός υπόγειου αποχετευτικού συστήματος καταλήγει στον ποταμό Κεραγιόνγκ. Η κυβέρνηση δέχτηκε την πρόταση εκμετάλλευσης 3χιλ. τμήματος της σήραγγας εκτροπής του νερού σαν μια σήραγγα 2x2 κυκλοφορίας, με λωρίδες έκτακτης ανάγκης, όταν η σήραγγα δεν εκτρέπει το νερό. Η οδική σήραγγα θα ανακούφιζε την κυκλοφοριακή συμφόρηση των νότιων οδικών αρτηριών της πόλης, ενώ θα κατασκευάζονταν και δυόδια για να καλυφθεί μέρος των εξόδων υλοποίησης του έργου.

Η σήραγγα διέρχεται από τον ασβεστόλιθο της Κουάλα Λουμπούρ σε μικρό βάθος. Οι καρστικοποιημένοι σχηματισμοί είναι καλλυμένοι από χαλαρές άμμους, τύρφες ή και προϊόντα κασσίτερου από την εξόρυξή του στην περιοχή.

Οι τεταρτογενείς αλλουβιακές αποθέσεις είναι γενικά μεγάλου πάχους 4-5μ. παρόλα αυτά στις καρστικές περιοχές μπορεί το υπόβαθρο να βρίσκεται και σε βάθη 20-30μ.

Το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα είναι 1,5-1μ. κάτω από την επιφάνεια. Η περατότητα του πετρώματος είναι γενικά χαμηλή. Δραστικές αλλαγές αναμένονται στις καρστικοποιημένες περιοχές ή στις ρωγματομένες ζώνες.

Η σήραγγα από τα βόρεια προς τα νότια διέρχεται από αλλούβια περίπου σε μήκος 2,5χλμ. Για μήκος 0,7χλμ αναμένονται μικτές συνθήκες, ενώ στην συνέχεια η σήραγγα διέρχεται από τον ασβεστόλιθο. Τα τελευταία 200μ είναι σε υπολλειματικά εδάφη γρανίτη στον σχηματισμό του Κενι Χιλ. Η πλήρης κάλυψη της σήραγγας κυμαίνεται μεταξύ 0,8-1,8 διαμέτρου. Στις θέσεις των ασβεστολίθων η κάλυψη αναμένεται να είναι 3-7 μ.

Η περιοχή είναι ιδιαίτερα ευάλωτη στην υποβάθμιση των υπόγειων υδάτων. Η μείωση του επιπέδου του υδροφόρου ορίζοντα είναι γνωστό ότι προκαλεί την εμφάνιση καταβοθρών σε καρστικές περιοχές, πολλές φορές σε πολύ κοντινή απόσταση με τις εκσκαφές. Τα αλλουβιακά καλύμματα παράγουν διαφορετικές καθιζήσεις κατ' αναλογία με το πάχος τους επάνω στο υπόβαθρο. Επομένως, μόνο μέθοδοι εκσκαφής θα μπορούσαν να εφαρμοστούν για την πρόληψη της υποβάθμισης του νερού.

Εφαρμόστηκε έρευνα με σκοπό τον προσδιορισμό του προφίλ του εδάφους κατά μήκος της σήραγγας. Πιο συγκεκριμένα εφαρμόστηκαν οι εξής μέθοδοι:

- 334 γεωτρήσεις
- Έρευνα μικροσεισμικότητας, η οποία εφαρμόστηκε για θέσεις που το υπόβαθρο βρίσκονταν σε μεγάλα βάθη και υπήρχε η παρουσία σπηλαίων
- Δοκιμές αντίστασης και σεισμικότητας
- Αναγνώριση ευάλωτων περιοχών με αστικές υποδομές, όπως σιδηροδρομικές γραμμές, γέφυρες κ.τ.λ
- Σταθεροποίηση και ενίσχυση των περιοχών αυτών για την σωστή εφαρμογή του TBM, με την χρήση 1300 οργάνων στην περιοχή.
- Ιδιαίτερη προσοχή στις περιοχές πιθανών κενών σπηλαίων που αποτελούν κίνδυνοι για τις ευάλωτες περιοχές.

Η χρήση TBM μικτής ασπίδας είναι απαραίτητη για την εκσκαφή κάτω από το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα και την παρουσία καρστικών πετρωμάτων. Τα κριτήρια επιλογής του είδους του TBM είναι:

- Η ευθυγράμμιση της σήραγγας πρέπει να είναι όσο το δυνατόν παράλληλη στον δρόμο που βρίσκεται στην επιφάνεια.
- Το κάλυμμα της σήραγγας είναι ρηχό με μόνο 10-20μ.
- Σύστημα εισπίεσης με φυσαλίδες αέρα για τον έλεγχο και υποστήριξη της πίεσης του μετώπου με σκοπό την πρόληψη από την εμφάνιση περιστατικών καταβόθρων
- Τα μηχανήματα πρέπει να δουλεύουν κυρίως σε ασβεστολιθικό περιβάλλον. Πολλοί τομείς αναμένεται να εμφανίζουν κοιλότητες είτε εμπλουτισμένες είτε κενές με απότομη εμβάθυνση του υποβάθρου. Επομένως τα μηχανήματα πρέπει να είναι ικανά να λειτουργήσουν σε μικτές συνθήκες.

Σε καρστικές συνθήκες, η πίεση του μετώπου είναι πολλή σημαντική. Στην αρχή της ισορροπίας των υδροστατικών και γήινων πιέσεων με την πίεση του μετώπου, χρησιμοποιώντας τσιμεντολάσπη το ισοζύγιο των δυνάμεων διατηρείται. Το γεγονός αυτό ωστόσο αφορά την περίπτωση κοιλοτήτων εμπλουτισμένων με νερό ή εδαφικό υλικό.

Οι κοιλότητες που δεν είναι εμπλουτισμένες ή είναι εν μέρη εμπλουτισμένες παρουσιάζουν υψηλό κίνδυνο. Αυτές οι κοιλότητες μπορεί να προκαλέσουν την απώλεια της πίεσης του μπεντονίτη και την κατάρρευση του μετώπου της σήραγγας ως επακόλουθο.

Οι σήραγγες Pajares στην βορειοδυτική Ισπανία

Οι σήραγγες αυτές κατασκευάζονταν από το 2005-2009 στην ορεινή περιοχή της Κανταβρίας, η οποία χαρακτηρίζεται από μια περίπλοκη γεωλογική δομή, με ποικιλία πετρωμάτων που μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες παλαιozoικών υλικών:

- 1) Σχιστόλιθοι και σχιστόλιθοι με ψαμμίτες
- 2) Ψαμμίτες και χαλαζίτες

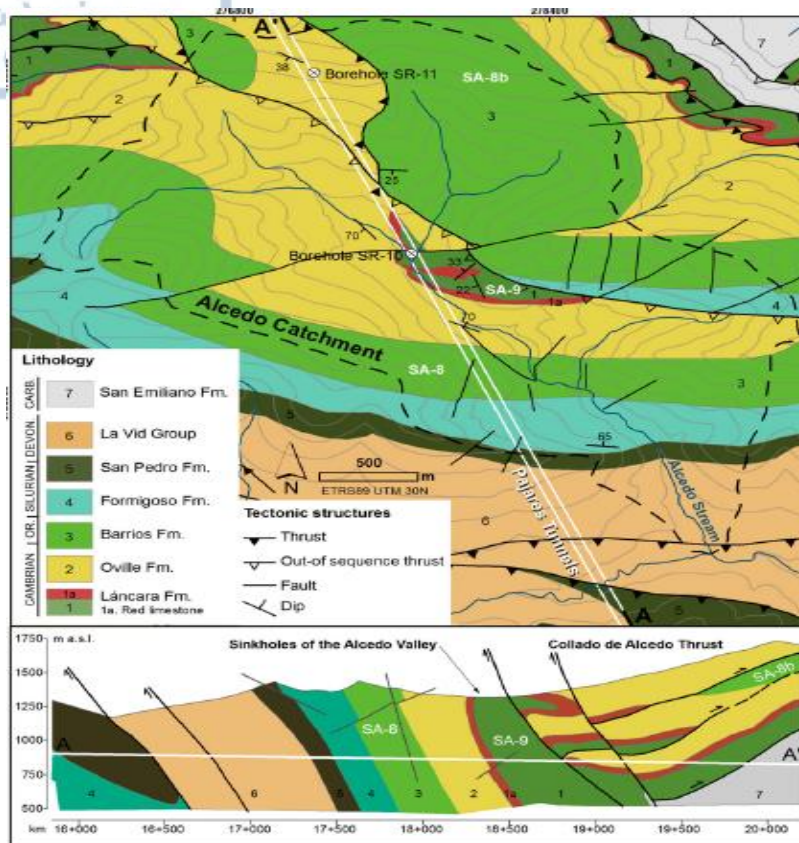
3) Ασβεστώδη υλικά

Η διαδρομή τους εκτείνεται από τις τοποθεσίες Λυόν έως Αστούριες και έχει διεύθυνση BBD-NNA με μέγιστο βάθος τα 1,1 χιλιόμετρα. Το μήκος τους είναι 21,9 χιλ. και η διάμετρός τους 8,5 μέτρα. Και οι 2 σήραγγες επικοινωνούν μεταξύ τους με στοές κάθε 400 μέτρα. Ο κεντρικός τομέας συνδέεται με τις σήραγγες Buiza και Folledo.

Η κατασκευή των σηράγγων έγινε με την χρήση TBM. Η υποστήριξη τους αποτελείται από υψηλής αντοχής προκατασκευασμένα δαχτυλίδια τσιμέντου, με το καθένα να διαχωρίζεται σε 7 μέρη. Σκυρόδεμα διαφορετικών χαρακτηριστικών χρησιμοποιήθηκε ανάλογα με τις απαιτήσεις του κάθε τμήματος των σηράγγων. Η στοά Buiza κατασκευάστηκε επίσης με TBM, ενώ η Folledo με την μέθοδο NATM. Ακόμη για τον τομέα στον οποίο παρατηρήθηκαν ασβεστολιθικά υλικά και καρστικά έγκοιλα, χρησιμοποιήθηκαν δύο TBM διπλής μονής ασπίδας στο δυτικό και ανατολικό κομμάτι της σήραγγας.

Στην περιοχή της κοιλάδας Alcedo στο τμήμα της Λυόν παρατηρήθηκε μια περίπλοκη γεωλογία με πολλές μηχανικές και υδρογεωλογικές συμπεριφορές. Αυτή αποτελούνταν από ασβεστόλιθους, δολομίτες χαλαζίτες, σχιστόλιθους, ψαμμίτες παλαιοζωικής ηλικίας, ενώ το ανώτερο στρώμα ήταν τεταρτογενείς ποταμοχειμνάρειες αποθέσεις. Η περιοχή δέχτηκε έντονη συμπίεστική και εκτατική τεκτονική με αποτέλεσμα να εμφανίζει πολλές θραυσιγενείς περιοχές.

Η έρευνα στην περιοχή της κοιλάδας Alcedo αποτελεί ένα παράδειγμα των αντίκτυπων που έχουν στην επιφάνεια η διατρήσεις για την κατασκευή των σηράγγων που βρίσκονται σε καρστικό περιβάλλον μέσα στην φρεατική ζώνη. Αυτοί οι αντίκτυποι κυρίως βασίζονται στην ανάπτυξη καταβοθρών και σχετίζονται με την μεταβολή της υδρογεωλογικής κατάστασης της τοποθεσίας.



Εικόνα 5.4: Γεωλογικός χάρτης της περιοχής Alcedo. (Valenzuela P. et al. 2015).

Πιο συγκεκριμένα το υδρογεωλογικό καθεστώς της κοιλάδας μεταβλήθηκε διότι η γενική αποστράγγιση που σχετίζονταν με τις διατρήσεις των σηράγγων Pajares προκάλεσαν την πτώση της στάθμης του νερού, όχι μόνο στον καρστικοποιημένο υδροφόρο, αλλά και στις ανώτερες τεταρτογενείς αποθέσεις.

Από το 2007 έως σήμερα σχηματίστηκαν 25 καταβόθρες, η προέλευση των οποίων ερμηνεύεται ως αποτέλεσμα των διαδικασιών διάχυσης που επηρέασαν τα τεταρτογενή συνεκτικά ιζήματα (παρουσία αργίλου). Επιπλέον, η αύξηση της διήθησης και της υπόγειας ροής στο εσωτερικό του υδροφόρου ευνόησαν την επιφανειακή διάβρωση των τεταρτογενών αποθέσεων, αυξάνοντας το μέγεθος των καταβόθρων.



Εικόνα 5.5: Γεωγραφική τοποθεσία της πεδιάδας Alcedo και της κατασκευής του έργου. (Velenzuela P. et al. 2015)

Πλέον, το ποτάμι της Alcedo, συμπεριφέρεται σαν ένα ποτάμι που χάνει όλη την επιφανειακή ροή από διήθηση μέσα από 7 ενεργές κοιλότητες στην βάση του. Γι αυτόν τον λόγο, μια έκταση 100 μέτρων από τον ποταμό είναι ξηρή κατά την διάρκεια όλου του χρόνου και το ανώτερο τμήμα του υδροκρίτη είναι απομονωμένο από την υπόλοιπη κοιλάδα, γεγονός που προκαλεί σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα.

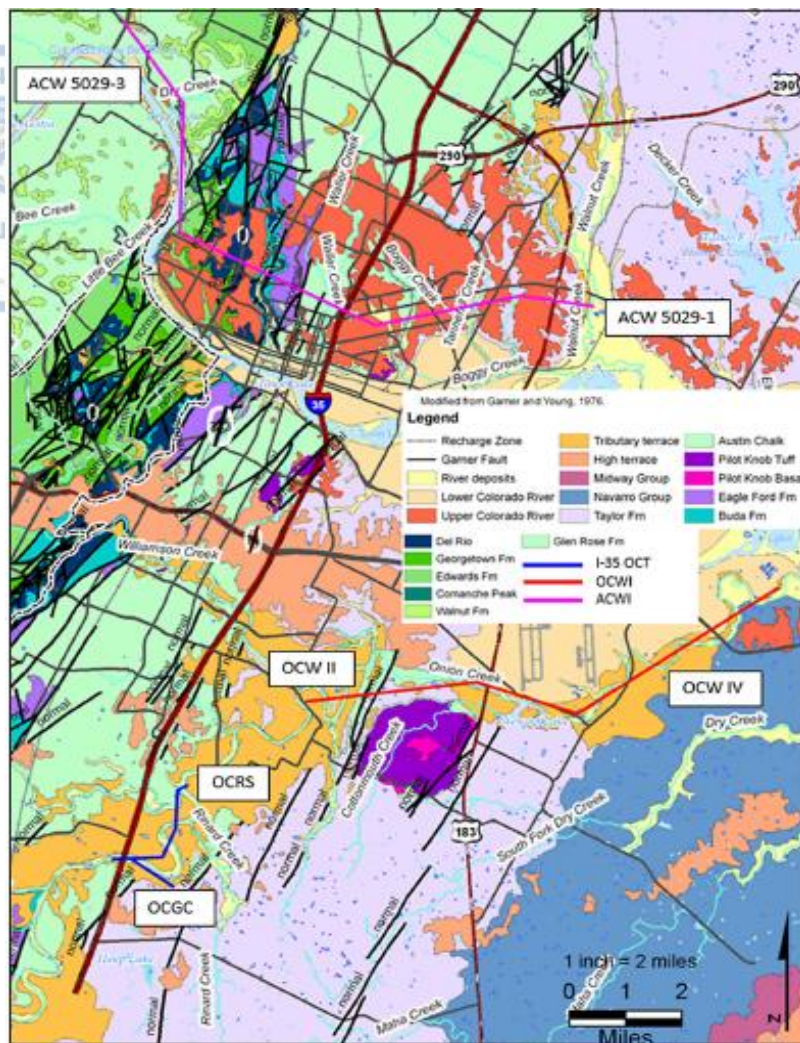
Η μέθοδος που εφαρμόστηκε για την προσέγγιση του προβλήματος αυτού επέτρεψε την γνώση του υδρογεωλογικού καθεστώτος της περιοχής της κατασκευής του έργου πριν την έναρξή του, καθώς επίσης και τον όγκο της κατείδυσης από τις καταβόθρες.

Κατασκευή σήραγγων στο κεντρικό Τέξας

Η περιοχή του κεντρικού Τέξας βρίσκεται στην ζώνη ρηγμάτων Balcones, που αποτελείται από ανενεργά κανονικά ρήγματα με διεύθυνση ΝΔ-ΝΑ και διαχωρίζει το πλατώ Edwards στα δυτικά, από τις παράκτιες πεδιάδες στα ανατολικά και νοτιοανατολικά. Με ανώτερα τα στρώματα των αλλουβιακών αποθέσεων, τα υποκείμενα πετρώματα είναι ηλικίας Άνω Κρητιδικού και πρόκειται για ασβεστόλιθους, ασβεστίτες της ενότητας Austin και σχιστόλιθους της ενότητας Eagle Ford. Ακόμη παρατηρούνται και δολομιτικοί ασβεστόλιθοι στα δυτικά τμήματα. Οι αποθέσεις της περιοχής είναι κυρίως θαλάσσιες, λόγω της παρουσίας του κόλπου του Μεξικού. Στον πίνακα 5.1 παρουσιάζονται με λεπτομέρεια τα πετρώματα της κάθε ενότητας πετρωμάτων, καθώς επίσης και σήραγγες που κατασκευάστηκαν στην περιοχή.

Πίνακας 5.1: Οι στρωματογραφία του κεντρικού Τέξας και οι σήραγγες που διαπέρασαν συγκεκριμένες ενότητες πετρωμάτων. (Caruso C. et al.)

Period	Unit	Description
Quaternary	Alluvium	Gravel, sand, silt, clay
Upper Cretaceous (Gulf)	Taylor Group (ACW5029-1, OCW II & IV)	Thick massive, calcareous claystone. Unweathered Taylor rock is typically massive with little trace of bedding.
	Austin Group (Chalk)* (OCRS, OCGC, ACW, OCW II)	Alternating beds of chalky limestone and argillaceous limestone, referred to as volcanic deposits and marl.
	Eagle Ford Group†	South Bosque Lake Waco Laminated shale, lacks abundant limestone Shale with thinly bedded limestone and bentonite layers
	Pepper Shale	Buda Limestone Grayson Marl (Del Rio Clay)‡
Cretaceous (Comanche)	Georgetown Limestone	Edward Limestone
	Glen Rose Form. (ACW 5029-3)	Dolomitic Limestone and Marl



Εικόνα 5.6: Ο χάρτης της περιοχής και οι σήραγγες που κατασκευάστηκαν κατά μήκος της. (Caruso C. et al.)

Όπως παρατηρούμε στην εικόνα 5.6, στο νότιο τμήμα της περιοχής κατασκευάστηκε σήραγγα λυμάτων, με βάση το πρόγραμμα 1-35, σε 3 τμήματα, την Onion Creek Rinard to Slaughter (OCS), την Onion Creek Golf Course (OCGC) και η σήραγγα σύνδεσής τους. Το πρώτο τμήμα έχει ύψος υποκείμενων 2,7 μέτρα, με τα 1,8 μέτρα να είναι πυροκλαστικά υλικά. Για την κατασκευή του χρησιμοποιήθηκε TBM, εκτός από ένα μικρό τμήμα 15 μέτρων που αποτέλεσε την σύνδεσή του με το τμήμα OCGC. Για την εκσκαφή του δεύτερου τμήματος χρησιμοποιήθηκε επίσης TBM. Δίπλα στο πρόγραμμα 1-35 κατασκευάστηκαν

σήραγγες όπως η Austin Crosstown Wastewater (ACW) που χωρίζεται σε 2 τμήματα που βρίσκονται βόρεια και βορειοανατολικά και η Onion Creek Wastewater (OCW), που αποτελείται εξίσου από δύο τμήματα στο κεντρικό Τέξας.(Εικ.5.6, Πίνακας 5.2)

Πίνακας 5.2: Οι σήραγγες του κεντρικού Τέξας, τα χαρακτηριστικά τους και τα μέτρα υποστήριξης που εφαρμόστηκαν για την κάθε μια. (Caruso C. Et al.)

Contracts	Tunnel Size (m)	Tunnel Length (km)	Contractors	TBM	Bedrock Types	Tunnel Supports	Initial Tunnel Support Ground Risks
I-35 OCRS	1.6-2.2	1.6	Southland	SCI & Road Header	Austin	Rock Bolts, Plates	Shallow rock cover, sloughing, overbreak, water infiltration
I-35 OCGC	2.2	2.3	S.J.Louis	Robbins	Austin	Rock Bolts	Shallow rock cover, Sloughing, overbreak
ACW-5029-1	3.2	9.2	Peter Kiewit Sons	Calweld	Austin, Taylor	35% unsupport, 45% Ribs/lagging, Rock Bolts, 20% Shotcrete/sealer	Shallow rock cover, sloughing, overbreak, water infiltration, slickensides, faults
ACW-5029-3	2.6-2.9	7.9	Granite	Robbins	Austin Glen Rose	Not installed	Sloughing, overbreak, faults
OCW-4I	2.8	6.3	Seven K	Lovat	Austin, Taylor	Ribs/lagging	Sloughing, overbreak, water infiltration, faults, slickensides
OCW-4V	2.8-3.0	9.0	Mole/S&M (JV)	Lovat	Taylor	Ribs/lagging, Plywood, Channels	Water infiltration, overbreak, faults, slickensides

Τα τμήματα OCRS,OCGC βρίσκονται στην ενότητα Austin, η οποία αποτελείται από πετρώματα υψηλής αντοχής και ποιότητας. Έτσι για σήραγγες μικρής διαμέτρου, η προυποστήριξη δεν ήταν απαραίτητη σε αυτά τα πετρώματα παρά μόνο ορισμένα τοπικά αγκύρια. Εξαίρεση αποτελεί το τμήμα με τα πυροκλαστικά/πηλούς και τις ζώνες ρηγμάτων, όπου χρησιμοποιήθηκαν πλάκες επένδυσης(ή χαλύβδινα πλευρά) και αγκύρια. Σε ορισμένες περιοχές οι μαλακές ζώνες κατέρρευσαν, πριν την τοποθέτηση των πλακών επένδυσης. Οι OCRS, OCGC επίσης εκσκάφθηκαν σε περιοχές με πολλές διασταυρώσεις ποταμών με λιγότερο από 3 μέτρα υποκείμενο. Παρόλη την επικινδυνότητα της κατάστασης και της πιθανότητας μεγάλων εισροών κάτω από τις διασταυρώσεις αυτές, δεν έγινε η απαραίτητη διερεύνηση και η προ-ενεμάτωση στην περιοχή για την προετοιμασία της κατασκευής. Ευτυχώς δεν παρατηρήθηκαν προβλήματα εισροών στις σήραγγες.

Η ACW 5029-1 κατασκευάστηκε στην ενότητα Taylor στα δυτικά και συνεχίστηκε στην Austin στο εσωτερικό της ζώνης ρήγματος. Το έδαφος αποτελούνταν από πηλόλιθο και αλλούβια με εισροή νερού στο εσωτερικό της Taylor. Η αντοχή και η

φέρουσα ικανότητα του πετρώματος δεν ήταν αρκετή για να τα στηρίξει. Χρησιμοποιήθηκαν ασπίδα στην ουρά του TBM, και ένα σύστημα υποστήριξης των πλευρών με χαλύβδινα πλευρά και δοκών, καθώς επίσης και σύστημα ώθησης. Στην ενότητα Austin, υποστήριξη εφαρμόστηκε μόνο σε μια περιοχή όπου το ρήγμα μετέφερε σχιστόλιθο στο μέτωπο της σήραγγας, με χαλύβδινα αγκύρια, αγκύρια βράχου και λεκάνες εξόρυξης.

Η ACW 5029-3 κατασκευάστηκε στην ζώνη ρήγματος και συνεχίστηκε μέχρι την ενότητα Glen Rose. Δεν χρησιμοποιήθηκαν μέτρα προυποστήριξης. Το μόνο εδαφικό πρόβλημα ήταν η παρουσία 1 μέτρου μαρμάρου.

Παρόμοια με την προηγούμενη σήραγγα, η OCW II εκσκάφθηκε στις ενότητες Taylor και Austin, με πυροκλαστικές αποθέσεις και την παρουσία ασβεστολίθου τοπικά. Λόγω της παρουσίας αυτών των υλικών χαμηλής αντοχής, το σύστημα προυποστήριξης που εφαρμόστηκε ήταν σύστημα υποστήριξης των πλευρών με χαλύβδινα πλευρά και δοκών.

Η OCW IV εκσκάφθηκε στην ενότητα Taylor και σαν μέτρα προυποστήριξης χρησιμοποιήθηκαν κλιμακωτές διπλές τρώσεις κόντρα πλακέ καθώς επίσης και χυτοσίδηρος για την σταθερότητα της τροχιάς και πρόληψη της αλλοίωσης του πετρώματος. Σε περιπτώσεις στιλπνών επιφανειών, και εδάφους κερματισμένου. χρησιμοποιήθηκαν διάυλοι ελαφρού χάλυβα για την ενίσχυση του κόντρα πλακέ.

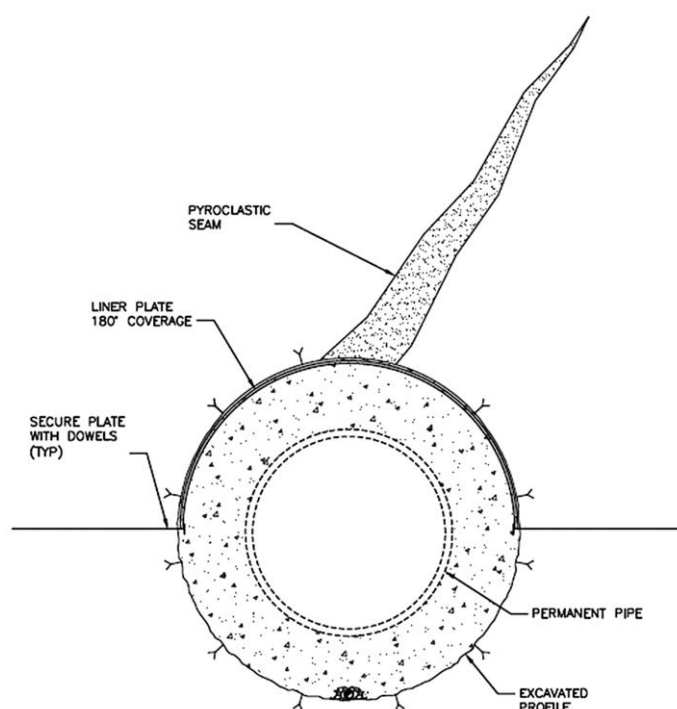
Η πιο συνηθισμένη μέθοδος για την προστασία από πυροκλαστικά υλικά είναι η εγκατάσταση πλάκας επένδυσης. για να καλύψει εντελώς τα εκτεθειμένα πυροκλαστικά υλικά. Ωστόσο η πλάκα επένδυσης μπορεί να θεωρηθεί ακατάλληλη σε κάποιες εφαρμογές του TBM, όπου ο βράχος δεν είναι ικανός να αντέξει τις ωθήσεις του μηχανήματος.

Για εδάφη με πιο εκτενή παρουσία πυροκλαστικών υλικών, τα χαλύβδινα πλευρά και οι δοκοί υποστήριξης παρέχουν ίδια αποτελέσματα με την πλάκα επένδυσης, παρέχοντας επιπλέον υποστήριξη στις ώθησεις του TBM.

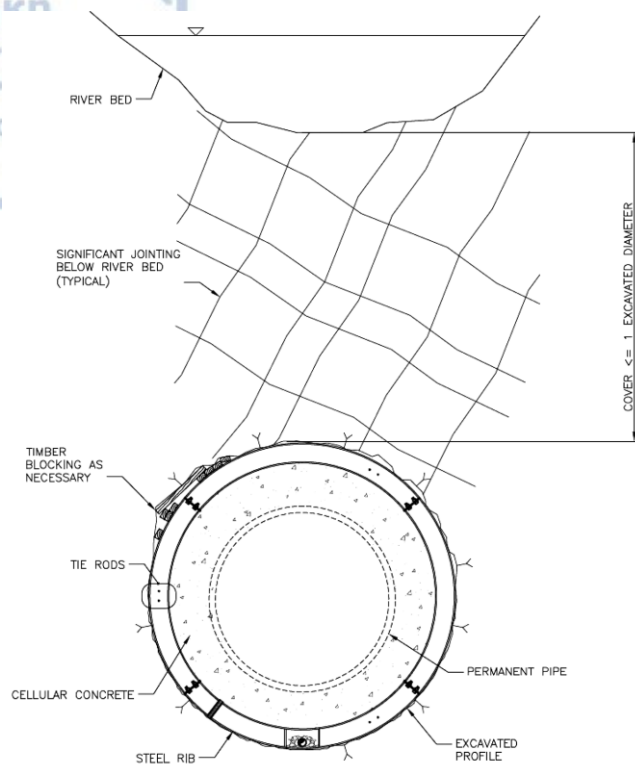
Πίνακας 5.3: Τα μέτρα προυποστήριξης που χρησιμοποιήθηκαν στο κεντρικό Τέξας. (Caruso C. et al.)

Des. No.	Support Description	Ground (Rock) Type	Mitigated Ground Risk	Construction Logistical Limitation	Approx. Installation Time
I	Steel Rib & Lagging	Squeezing (Taylor Group Claystone, Bentonite and Marl)	Excessive Overbreak, Excessive Convergence, Rockfalls	Internal space limitations, which affects productivity particularly in smaller tunnels. Difficulties in surveying (such as capturing curves) and water handling if pumps are necessary. Material mobilization adds affects production rate. Benefit to support: No grouting necessary.	20-30 min/Set
II	Liner Plate	Squeezing or low strength highly weathered (Eagle Ford South Bosque Shale)	Light Groundwater Inflows, Excessive Convergence	Relatively easy to install. Grouting is necessary because of the potential for tunnel ovality. Slower installation. Benefit to support: Does not significantly decrease the amount of internal space within tunnel. Material mobilization within tunnel is simple.	5-10 min/plate 10 min for grouting
III	Semi-circle/Half-moon Plate	Competent Rock w/ Pyroclastic materials (Austin Group, Eagle Ford Lake Waco Shale)	Pyroclastics, Rockfalls, Light Groundwater Inflows	Quick installation. No loss of space in tunnel. No grouting required. Material mobilization within tunnel is simple.	15 min/semi-circle
IV	Patterned Bolts	Blocky (Austin Group, Eagle Ford Lake Waco Shale)	Rockfalls	Difficulty mobilizing bolt and drill within smaller tunnels. Drill space is limited. Patterns not always sufficient for ground conditions.	15 min/each
V	Spot-Bolting	Jointed (Austin Chalk, Glen Rose Dolomitic Limestone)	Rockfalls	Similar Limitations as Patterned Bolts, with less bolting.	15 min/each
Add.	Probing and Grouting	Blocky, jointed near Creek crossing, Shallow Bedrock Cover, Fault Zone	Water Inflow, Crown Collapse, Face Instability	Entirely dependent on the ground condition and its susceptibility to groundwater. Water is the deciding factor. Dewatering is involved and substantially reduces production.	Varies based on amount of ground-water encountered.

Notes: All installation times are approximate depending on the site specific ground condition.



Σχήμα 5.2: Εφαρμογή μισής πλάκας επένδυσης κάτω από την πυροκλαστική ραφή. (Caruso C. et al.)



Σχήμα 5.3: Εφαρμογή χαλύβδινων πλευρών και δοκών κάτω από το πέρασμα ποταμών.
(Caruso C. et al.)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως κύριο αντικείμενο την περιγραφή της διαδικασίας μηχανοποιημένης διάνοιξης σήραγγας σε περιβάλλον που έχει υποστεί καρστικοποίηση. Οι ανθρακικοί σχηματισμοί αντιδρώντας με το νερό, υπόκεινται σε καρστική διάλυση, η οποία οδηγεί σε μια μεταβολή των φυσικών και μηχανικών τους ιδιοτήτων και της γεωμετρίας τους. Προκύπτει λοιπόν μια διαφοροποίηση ως προς την αντοχή τους, η οποία καθιστά δυσκολότερη την πρόβλεψη των γεωλογικών συνθηκών που εντοπίζονται κατά την διάνοιξη. Στόχος λοιπόν της εργασίας αυτής είναι αντιμετώπιση ενός απρόβλεπτου καρστικού περιβάλλοντος στην περίπτωση κατασκευής μιας σήραγγας, με την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου για την γεωλογική μελέτη της περιοχής του έργου, τον έγκαιρο εντοπισμό και αντιμετώπιση των καρστικών σχηματισμών και την επιλογή του κατάλληλου μηχανήματος διάνοιξης.

Οι πιο σημαντικές συνθήκες οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπόψη για την κατασκευή μιας ασφαλούς σήραγγας είναι η ευστάθεια των τοιχωμάτων, η ευστάθεια του μετώπου, η παρουσία ρηγμάτων ή συμπιεστού εδάφους, η ποσότητα του εισερχόμενου νερού, η παρουσία αργιλικού εδάφους, αερίων, υψηλών θερμοκρασιών και καρστικών κενών. Ένας καρστικός σχηματισμός μπορεί να παρατηρείται εύκολα στην επιφάνεια, με την μορφή γλυφών, δολίνων, ουβάλων, πολγών ή δυσκολότερα υπογείως με την μορφή καταβοθρών, σπήλαιων ή έγκοιλων. Το μέγεθος, το σχήμα του, ο βαθμός καρστικοποίησης, η πιθανή πλήρωσή του και η σχέση του με το νερό, είναι χαρακτηριστικά, τα οποία παρατηρούνται με την έρευνα στην περιοχή της κατασκευής.

Αρχικά, με την γεωλογική χαρτογράφηση η περιοχή μελετάται ευρύτερα και στην συνέχεια στην θέση του έργου, όπου και εντοπίζονται κυρίως στην επιφάνεια οι γεωλογικές δομές που αποτελούν ένδειξη καρστικής διάλυσης. Με την χρήση μέσων όπως η δορυφορική αεροφωτογραφία και το σύστημα GIS, μπορεί να γίνει η ψηφιοποίηση των χαρτών της περιοχής και η κατασκευή μοντέλων γεωλογικού, υδρογεωλογικού και σπηλαιολογικού ενδιαφέροντος, καθώς επίσης και επικινδυνότητας στην θέση της σήραγγας. Για την πιο λεπτομερή καταγραφή της γεωμετρίας του καρστικού σχηματισμού, μπορεί αρχικά να εφαρμοστεί η μέθοδος της ιχνηθέτησης, που προσεγγίζει την κίνηση του νερού στο εσωτερικό των ζωνών

διάρρηξης του πετρώματος για μικρά βάθη. Με γεωφυσικές και σεισμικές μεθόδους, όπως ηλεκτρικής τομογραφίας, μικροβαρύτητας, GPR, TSP κ.α μπορούμε να αντλήσουμε πληροφορίες για τις διαστάσεις των καρστικών έγκοιλων, χωρίς να υπάρξει καμία διατάραξη στην μάζα του πετρώματος. Συγκεκριμένα, οι μέθοδοι ηλεκτρικής αντίστασης παρουσιάζουν καλύτερα αποτελέσματα στον εντοπισμό υπόγειων κοιλοτήτων, απ' ότι οι ηλεκτρομαγνητικές, υπό την προϋπόθεση ότι η επιφάνεια του εδάφους ή πετρώματος δεν έχει έντονο ανάγλυφο. Η τομογραφία της ηλεκτρικής αντίστασης σε συνδυασμό με την μέθοδο μικροβαρύτητας από την άλλη μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την διάκριση των καταβοθρών από τα σπήλαια, ωστόσο παραμένει ένας ακριβός συνδυασμός μεθόδων. Η μέθοδος GPR είναι καταλληλότερη για τον εντοπισμό και καταγραφή σε υψηλότερη ανάλυση των έγκοιλων, βασίζεται όμως σε μετρήσεις μικρού βάθους. Τέλος, με σεισμικές έρευνες μπορεί να ερευνηθεί η ποιότητα του πετρώματος και της παρουσίας ρηγμάτων. Ωστόσο καμία καρστική περιοχή δεν είναι εντελώς όμοια με μια άλλη, γι αυτό και κρίνεται απαραίτητος ο συνδυασμός αυτών των μεθόδων για την αντιμετώπιση κάθε ξεχωριστού σχηματισμού. Βασικό χαρακτηριστικό ενός καρστικού περιβάλλοντος είναι η σχέση του με την υδρογεωλογία της περιοχής. Συγκεκριμένα, οι υδραυλικές παράμετροι τοπικά της σήραγγας και ευρύτερα, η αναγνώριση και ταξινόμηση του υδροφόρου ορίζοντα, ο καθορισμός των υδρογεωλογικών λεκανών και των πηγών, ο αριθμός των διακλάσεων του πετρώματος, ο συντελεστής διείσδυσης μετεωρικού νερού και η παρουσία υπόγειων έγκοιλων είναι παράμετροι που πρέπει οπωσδήποτε να καταγραφούν και να ληφθούν υπ' όψιν, διότι επηρεάζουν την ασφάλεια του έργου τόσο κατά την κατασκευή του όσο και μετά την υλοποίησή του. Το τελικό αποτέλεσμα αυτής της έρευνας είναι η κατασκευή τεχνικογεωλογικών και υδρογεωλογικών μοντέλων, τα οποία διευκολύνουν την επιλογή του κατάλληλου σχεδιασμού της σήραγγας και μελέτης του απαραίτητου εξοπλισμού για την αντιμετώπιση κινδύνων που σχετίζονται με τις καρστικές συνθήκες. Από υδρογεωλογική άποψη τα μοντέλα των σπηραγγών κατασκευάζονται είτε κάτω από την μέγιστη στάθμη του υπόγειου νερού, είτε στην ζώνη ανάμεσα στην μέγιστη και ελάχιστη στάθμη, είτε κάτω από την ελάχιστη στάθμη, στην κορεσμένη ζώνη. Διαφέρουν ανάλογα με την γεωμετρία του καρστικού υδροφορέα και την θέση του.

Για την αποφυγή των προβλημάτων που παρουσιάζονται σε καρστικοποιημένο περιβάλλον, εφαρμόζονται μέθοδοι, όπως η ενεμάτωση, το εκτοξευμένο σκυρόδεμα,

η χαλύβδινη ομπρέλα, οι δοκοί προπορείας, οι διατρήσεις ανίχνευσης και παρακολούθησης και τα αποστραγγιστικά συστήματα. Επομένως, με την γεφύρωση και την πλήρωση των κενών κοιλοτήτων, τη σταθεροποίηση και ενεμάτωση των μαλακών υλικών πλήρωσής και τον έλεγχο των εισροών λάσπης και υπόγειου νερού με αποστραγγιστικά έργα πριν την διασταύρωση μετώπου και κοιλότητας , επιτυγχάνεται η αντιμετώπιση των καρστικών κενών και εισροών νερού και η ασφάλης κατασκευή και λειτουργία της σήραγγας.

Βασικός και τελικός παράγοντας για την μηχανοποιημένη διάνοιξη της σήραγγας είναι η επιλογή του κατάλληλου τύπου TBM. Σε καρστικά περιβάλλοντα οι πιο συνηθισμένοι τύποι είναι τα TBM ανοικτού τύπου, τα TBM πετρώματος με ασπίδα και τα TBM μικτού τύπου. Η πρώτη κατηγορία βασίζεται στην διαδικασία της δειγματοληψίας και προ-ενεμάτωσης για την λήψη μέτρων ενάντια στις εισροές του νερού, ενώ η δεύτερη έχει την δυνατότητα να σταματά την εισροή του νερού κλείνοντας το κοπτικό άκρο και σφραγίζοντας τα υπόλοιπα σημεία διαρροής. Η κατηγορία των μικτού τύπου TBM, είναι η πιο σύγχρονη και αποτελείται από μηχανήματα που είναι σχεδιασμένα να διασχίζουν πετρώματα διαφορετικών γεωλογικών τύπων και μπορούν να προσαρμοστούν απέναντι σε οποιαδήποτε απαίτηση για την κατασκευή της σήραγγας.



Ελληνική

- Βουβαλίδης Κ. (2011), Φυσική γεωγραφία, Θεσσαλονίκη: Δίσιγμα.
- Εξαδάκτυλος Γ. και Σταυροπούλου Μ. (2006), Κατασκευή και μηχανική των σιράγγων και των υπόγειων έργων, Χανιά
- Ρειζοπούλου Α. (2013), Καρστική γεωμορφολογία της περιοχής Όθρυς. Η περιοχή Μεγα-Λάκκου, Νεροσπηλιάς, Διατριβή ειδίκευσης Α.Π.Θ.
- Μαρίνος Β., Τεχνική Γεωλογία, Ζ' εξάμηνο τμήματος Γεωλογίας ΑΠΘ

Διεθνής

- Burden L.I. et al. (n.d) , Karst topography: noninvasive geophysical detection methods and construction techniques, The University of Virginia
- Caruso C. et al. (n.d), Initial ground support for tunneling in central texas, from designer's and owner's perspectives, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc
- Jeannin P. et al. (2015), Assessing karst-hydraulic hazards in tunneling—the Brunnmuhlespring system—Bernese Jura, Switzerland, Environ Earth Sci 74, 7655-7670
- Knez M. et al. (2016) Sediments in the S-647 Cave in the Kastelec Tunnel. In: Knez M., Slabe T. (eds) Cave Exploration in Slovenia. Cave and Karst Systems of the World. Springer

- Liping L. et al. (2016). Mechanism of water inrush in tunnel construction in karst area, *Geomatics, Natural Hazards and Risk* 7(1), 35-46
- Lok Home. (2016), Hard rock TBM tunneling in challenging ground: Developments and lessons learned from the field, *Tunnelling and Underground Space Technology* 57 , 27–32, Elsevier
- Marinos P.G. (2001), Tunelling and mining in karstic terrane; an engineering challenge, in: Beck and Herring (eds), *Geotechnical and Environmental Applications of Karst Geology and Hydrology*
- Milanović P. (2015), Hydraulic Properties of Karst Groundwater and Its Impacts on Large Structures in: Mudry J. et al. (eds.), *Karst Research in Limestone Hydrogeology*, Springer
- Milanovic P. (2015), Catalog of Engineering Works in Karst and Their Effects in: Stevanovic Z. (eds) *Karst Aquifers-Characterization and Engineering*, Springer
- Peila D. and Pelizza S. (2009), Ground probing and treatments in rock TBM tunnel to overcome limiting conditions, *Journal of Mining Science*, 45 (6), 602
- Ren D.J. et al. (2016), Geological formation and geo-hazards during subway construction in Guangzhou. Springer
- Schmitz R. and Schroeder C. (2006), Urban site investigation in the Belgian karst belt, *The Geological Society of London*

- Song K. et al. (2012), Identification, remediation and analysis of karst sinkholes in the longest railroad tunnel in South Korea, Engineering Geology, 135-136, Elsevier Journal
- Stevanović Z. (2015) Karst Environment and Phenomena. In: Stevanović Z. (eds) Karst Aquifers—Characterization and Engineering. Professional Practice in Earth Sciences. Springer,
- Velenzuela P. (2015), Active sinkholes: A geomorphological impact of the Pajares Tunnels (Cantabrian Range, NW Spain). Engineering Geology 196, 158-170, Elsevier
- Waltham A.C & Fookes P.G., (2003), Engineering classification of karst ground conditions, Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 36, 101-118,
- Yilmaz I. (2007), GIS based susceptibility mapping of karst depression in gypsum: A case study from Sivas basin (Turkey), Engineering Geology 90, 89-103, Elsevier Journal
- Xeidakis G.S. et al. (2004), Engineering geological problems associated with karst terrains: their investigation, monitoring and mitigation and design of engineering structures on karst terrains, Bulletin of the Geological Society of Greece vol. XXXVI, 2004 Proceedings of the 10th International Congress, Thessaloniki, April 2004



- www.linkedin.com
- www.speleoclubposeidon.gr
- www.hoehlenag.de
- www.bgs.ac.uk
- www.kgs.ku.edu
- www.polianthus.files.wordpress.com
- www.s3.amazonaws.com
- www.vitingeo.wikispaces.com
- www.teara.govt.nz
- www.lfgeopark.com
- www.geologikathemata.blogspot.gr
- www.mergili.at.com
- www.gsi.com
- <http://www.geographynotes.com>
- <https://www.sciencelearn.org.com>