



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ



ΑΓΓΕΛΙΚΗ ΡΕΪЗОΠΟΥΛΟΥ
ΓΕΩΛΟΓΟΣ

ΚΑΡΣΤΙΚΗ ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΑΝΑΤΟΛΙΚΗΣ
ΘΩΡΥΟΣ. Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΓΑ-ΛΑΚΚΟΥ,
ΝΕΡΟΣΠΗΛΙΑΣ

ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2013

Εικόνα εξωφύλλου: Η καρστική πόλγη του Μέγα-Λάκκου.

Εικόνα οπισθοφύλλου: Άποψη από το εσωτερικό της Νεροσπηλιάς.

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ

ΑΓΓΕΛΙΚΗ ΡΕΪЗОΠΟΥΛΟΥ
ΓΕΩΛΟΓΟΣ

ΚΑΡΣΤΙΚΗ ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΑΝΑΤΟΛΙΚΗΣ
ΘΩΡΥΟΣ. Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΓΑ-ΛΑΚΚΟΥ,
ΝΕΡΟΣΠΗΛΙΑΣ

ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2013

ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

ΤΗΣ

ΓΕΩΛΟΓΟΥ

ΑΓΓΕΛΙΚΗΣ ΡΕΪЗОΠΟΥΛΟΥ

ΜΕ ΘΕΜΑ

**ΚΑΡΣΤΙΚΗ ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΑΝΑΤΟΛΙΚΗΣ ΘΩΡΥΟΣ.
Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΓΑ-ΛΑΚΚΟΥ, ΝΕΡΟΣΠΗΛΙΑΣ**

Υπό την επίβλεψη του:

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ ΒΟΥΒΑΛΙΔΗ, Επίκουρου Καθηγητή του Τμήματος Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Και της συμβουλευτικής επιτροπής:

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ ΑΛΜΠΑΝΑΚΗ, Αναπλ. Καθηγητή του Τμήματος Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ ΒΟΥΔΟΥΡΗ, Επίκουρου Καθηγητή του Τμήματος Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2013

*Στον πατέρα μου, Θεόδωρο
&
Στις δύο μητέρες μου, Αγόρα και Αγγελική*

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την παρούσα διατριβή ειδίκευσης, η οποία εκπονήθηκε στο τμήμα Γεωλογίας, στον Τομέα Φυσικής και Περιβαλλοντικής Γεωγραφίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνετέλεσαν στην επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος.

Κατ' αρχάς ευχαριστώ ιδιαίτερα τον επιβλέποντα και σύμβουλο Επίκουρο Καθηγητή κ. **Κωνσταντίνο Βουβαλίδη** για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου το συγκεκριμένο θέμα και την ουσιαστική επιστημονική καθοδήγηση του σε όλη την πορεία μου προς την ολοκλήρωση του.

Πολλές ευχαριστίες οφείλω και στα υπόλοιπα μέλη της συμβουλευτικής μου επιτροπής για τις κατατοπιστικές τους υποδείξεις και τη βοήθεια που μου προσέφεραν, τον Αναπλ. Καθηγητή κ. **Κωνσταντίνο Αλμπανάκη** και τον Επίκουρο Καθηγητή κ. **Κωνσταντίνο Βουδούρη**.

Ευχαριστώ εγκάρδια τον Υπ. Διδάκτορα του Τμήματος Γεωλογίας Μάρκο Βαξεβανόπουλο και τα μέλη του συλλόγου Σπηλαιολογίας Θεσσαλονίκης «Πρωτέας», ιδιαίτερα το Γεωλόγο Γεώργιο Σωτηριάδη, την Ευγενία Κιουρεξίδου, το Γεώργιο Κονίδη, το φοιτητή Γεωλογίας Ευάγγελο Βασιλονικολό, την Άννα Μαυρομάτη και τη Ματίνα Σγουρομύτη για τη συμβολή τους στην έρευνα υπαίθρου.

Επίσης, ευχαριστώ τον Υπ. Διδάκτορα του Τμήματος Γεωεπιστημών του Πανεπιστημίου του Τορόντο Αναστάσιο Βενετικίδη και τον μεταπτυχιακό φοιτητή του Τμήματος Γεωλογίας Αλέξανδρο Γαϊτανόπουλο για την βοήθεια στο πείραμα της ιχνηθέτησης.

Ομοίως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Γεωλογίας Γεώργιο Συρίδη, τον Δρ. Γεωλογίας Τριαντάφυλλο Κακλή για την βοήθεια του στις χημικές αναλύσεις, τον Αναπληρωτή Καθηγητή του Γεωπονικού του Γ.Π.Α. Γεώργιο Σταμάτη για τις πολύτιμες συμβουλές του στο πείραμα της ιχνηθέτησης, το Γεωλόγο Γεώργιο Δημουλά για την παραχώρηση του βροχόμετρου και του μυλίσκου, τον σπηλαιοεξερευνητή κ. Κωνσταντίνο Ζούπη και την μεταπτυχιακή φοιτήτρια του Τμήματος Γεωλογίας Μαρίνα Καλπάκη για την άψογη συνεργασία μας και την ηθική υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών.

Τέλος, οι θερμότερες ευχαριστίες ανήκουν στην οικογένεια μου, η οποία με υποστήριξε και με βοήθησε να ξεπεράσω όλες τις δυσκολίες που αντιμετώπισα ως σήμερα. Η υλική και ηθική υποστήριξη τους συνέβαλε ουσιαστικά για την εκπόνηση διατριβής μου.

Περίληψη

Στην παρούσα Διατριβή Ειδίκευσης ερευνώνται τα καρστικά γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της ανατολικής Όθρυος και συγκεκριμένα στην περιοχή Μέγα-Λάκκου, Νεροσπηλιάς. Η σημαντικότερη υπόγεια καρστική μορφή είναι το σπήλαιο «Νεροσπηλιάς», ο μεγαλύτερος υπόγειος ποταμός της Θεσσαλίας.

Μελετώνται επιφανειακές καρστικές μορφές, όπως κοιλάματα διάλυσης, επιφανειακές χύτρες, γλυφές τοιχωμάτων, μαιανδροειδείς γλυφές αλλά και υπόγειες καρστικές μορφές όπως το σπήλαιο «Νεροσπηλιάς» και το σπήλαιο «Δρόμου» όσον αφορά τη δημιουργία και την εξέλιξη τους. Επίσης, ερευνώνται τα υδροχημικά χαρακτηριστικά του καρστικού νερού με σκοπό την κατάδειξη της γενετικής σχέσης των επιφανειακών και των υπόγειων καρστικών μορφών.

Μέσω πειράματος ιχνηθέτησης στη μεγαλύτερη επιφανειακή καρστική μορφή την πόλγη του «Μέγα-Λάκκου» αποδεικνύεται η υδρολογική σχέση της πόλγης με τον καρστικό αγωγό της «Νεροσπηλιάς» και τον αγωγό που καταλήγει στην πηγή «Βρύση».

Η Νεροσπηλιά αποτελεί καρστικό αγωγό που αρχικά διανοίγεται κατά μήκος τεκτονικού ρήγματος διεύθυνσης ΒΒΑ-ΝΝΔ πληρωμένου με νερό (φρεατική φάση σπηλαιογένεσης). Ο πρωταρχικός αυτός αγωγός διευρύνεται λόγω συνεχούς διάλυσης. Η συνολική διεύρυνση των καρστικών αγωγών της ευρύτερης περιοχής σε συνδυασμό με την τεκτονική ανύψωση οδηγεί στην ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα και στη μετέπειτα εκκένωσή της Νεροσπηλιάς κατά περιόδους και κατά θέσεις από νερό.

Το σπήλαιο «Δρόμου» είναι πρωτογενές τραβερτινικό σπήλαιο. Δημιουργείται από την απόθεση τραβερτινικού υλικού στα ασβεστολιθικά κορήματα του τεκτονικού πρανούς στην είσοδο της Νεροσπηλιάς. Η συνεχής απόθεση τραβερτίνη θα οδηγήσει στην ολική πλήρωση του σπηλαίου.

Η περιοχή του Μέγα-Λάκκου Νεροσπηλιάς χαρακτηρίζεται από την έντονη καρστική διάβρωση τόσο επιφανειακά όσο και υπόγεια λόγω της παρουσίας ανθρακικών πετρωμάτων και της έντονης τεκτονικής ανύψωσης. Η συνεχής καρστική διάβρωση θα οδηγήσει στη δημιουργία πλήθους δολινών και πολγών επιφανειακά και στην αποκάλυψη νέων καρστικών αγωγών-σπηλαίων.

Abstract

The aim of the present study is the investigation of the karstic geomorphological processes in the area of eastern Othris Mountain (Megas Lakkos – Nerospilia area). This thesis focuses on the geomorphological evolution of the superficial karstic features and underground karstic formations.

The superficial karstic features such as kamenitzas, effluent runnels, solution, channels (rinnenkarren), meanderkarren, rainpits of the Megas Lakkos – Nerospilia area were mapped as well as the caves Nerospilia and Dromou. Moreover, hydrogeological parameters such as electrical conductivity, pH and several ions concentrations were measured during this research in the entrance of “Nerospilia” cave. A dye tracing experiment was carried out in order to understand the underground karstic water’s movement. A saturated in water solution of NaCl was injected to a sinkhole in Megas Lakkos polje while electric conductivity was being measured in “Vrisi” spring and Nerospilia.

Nerospilia cave, the largest underground river in Thessalia Prefecture (Central Greece), constitutes the most important underground karstic feature. It’s developed in the upper Cretaceous limestones and overlying in the middle Cretaceous impermeable conglomerates. The total length of the cave is 1419 meters.

Dromou cave is developed under the travertine depositional process in the area of Nerospilia entrance from supersaturated Nerospilia’s solutions.

Based on the dye tracing experiment is proved that Nerospilia recharges the superficial water of Megas Lakkos area through several sinkholes and underground karstic pipes. The Megas Lakkos – Nerospilia area is characterized by intense superficial karstic erosion and underground karstic pipe evolution due to rapid tectonic uplift. This process will lead to the creation of several dolines, poljes and the exposure of a number of underground voids.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή.....	11
2. Γεωγραφικά - Μορφολογικά στοιχεία.....	12
3. Γεωλογικά στοιχεία.....	17
4. Καρστική Γεωμορφολογία.....	20
4.1 Καρστική διάβρωση.....	20
4.2 Επιφανειακές καρστικές μορφές.....	23
4.2.1 Μεγάλες επιφανειακές καρστικές μορφές.....	23
4.2.2 Μικρές επιφανειακές καρστικές μορφές.....	24
4.3 Υπόγειες καρστικές μορφές.....	26
4.3.1 Σπηλαιογένεση.....	27
4.3.2 Παράγοντες Σπηλαιογένεσης.....	29
5. Υδρολογία.....	31
5.1 Υδροχημεία.....	31
5.2 Ιχνηθετήσεις.....	34
6. Μεθοδολογία.....	35
6.1 Έρευνα Υπαίθρου.....	35
6.1.1 Χαρτογράφηση περιοχής.....	35
6.1.2 Χαρτογράφηση Επιφανειακών καρστικών μορφών.....	35
6.1.3 Χαρτογράφηση Υπόγειων καρστικών μορφών.....	35
6.1.4 Υδροχημεία.....	37
6.1.5 Ιχνηθέτηση.....	38
6.2 Εργασίες Γραφείου.....	38
6.2.1 Ανάλυση Χαρτογραφικών Δεδομένων (G.I.S.).....	38
6.2.2 Αποτύπωση του σπηλαίου της «Νεροσπηλιάς».....	38
6.2.3 Εργαστηριακές αναλύσεις.....	40
7. Αποτελέσματα.....	41
7.1 Γεωλογία – Γεωμορφολογία περιοχής μελέτης.....	41
7.2 Επιφανειακές Καρστικές μορφές στην περιοχή Μέγα-Λάκκου, Νεροσπηλιάς.....	46
7.2.1 Μεγάλες επιφανειακές καρστικές μορφές στη περιοχή μελέτης.....	46
7.2.2 Μικρές επιφανειακές καρστικές μορφές στη περιοχή μελέτης.....	48

7.3 Σπήλαιο «Νεροσπηλιά» Όθρυς.....	52
7.3.1 Χαρτογράφηση του σπηλαίου «Νεροσπηλιά».....	54
7.3.2 Περιγραφή Σπηλαίου «Νεροσπηλιά».....	56
7.3.3 Ιζήματα Σπηλαίου.....	64
7.3.4 Σπηλαιογένεση «Νεροσπηλιάς».....	74
7.4 Σπήλαιο «Δρόμου».....	84
7.4.1 Περιγραφή – Ιζήματα Σπηλαίου.....	85
7.4.2 Σπηλαιογένεση.....	87
8. Υδρολογία περιοχή μελέτης.....	88
8.1 Ανάλυση Υδροχημικών στοιχείων της «Νεροσπηλιάς».....	88
8.2 Παροχή νερού – Βροχομετρικά δεδομένα.....	89
8.3 Ιχνηθέτηση.....	90
9. Συμπεράσματα.....	94
10. Βιβλιογραφία.....	95
11. Παράρτημα.....	97

1. Εισαγωγή

Σκοπός της εργασίας

Η παρούσα εργασία που συντάχθηκε στο πλαίσιο του προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης έχει σκοπό να καταδείξει τα στοιχεία της καρστικής γεωμορφολογίας στο τμήμα της ανατολικής Όθρυς, στην περιοχή Νεροσπηλιάς, Μέγα-Λάκκου. Η Νεροσπηλιά αποτελεί το μεγαλύτερο υπόγειο καρστικό σπήλαιο (υπόγειος ποταμός) της Θεσσαλίας. Ήδη από τη δεκαετία του '70 είχε γίνει αντικείμενο εξερεύνησης από σπηλαιολογικούς συλλόγους, αλλά χωρίς να έχει μελετηθεί το ευρύτερο καρστικό περιβάλλον. Ένα από τα πολλά ερωτήματα που τέθηκαν στο παρελθόν είναι η σχέση της Νεροσπηλιάς με την πόλγη του Μέγα-Λάκκου. Επίσης, ήταν αναγκαία η καταγραφή των υπόγειων και επιφανειακών στοιχείων του καρστ για την καλύτερη κατανόηση της γεωμορφολογικής εξέλιξης. Στο γενικότερο πλαίσιο της εξέλιξης του καρστ κρίθηκε αναγκαίο να μελετηθεί η τεκτονική ανύψωση της περιοχής σε σχέση με τα καρστικά στοιχεία, όπως τα σπήλαια και το φαράγγι της Νεροσπηλιάς, αλλά και την ύπαρξη διαφορετικών λιθολογικών σχηματισμών.

Στη συγκεκριμένη μελέτη, αρχικά καταγράφηκαν οι επιφανειακές καρστικές μορφές. Πραγματοποιήθηκαν γεωλογικές παρατηρήσεις επί του υφιστάμενου γεωλογικού χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε., κλίμακας 1:50000, ο οποίος βελτιώθηκε στα όρια της περιοχής μελέτης. Επίσης, καταγράφηκαν οι υπόγειες καρστικές μορφές και χαρτογραφήθηκαν λεπτομερώς. Ειδικά, για τη Νεροσπηλιά και το σπήλαιο «Δρόμου» πραγματοποιήθηκε τοπογραφική αποτύπωση με γεωλογική πυξίδα και αποστασιόμετρο καθώς και χαρτογράφηση των γεωλογικών σχηματισμών και των τεκτονικών στοιχείων.

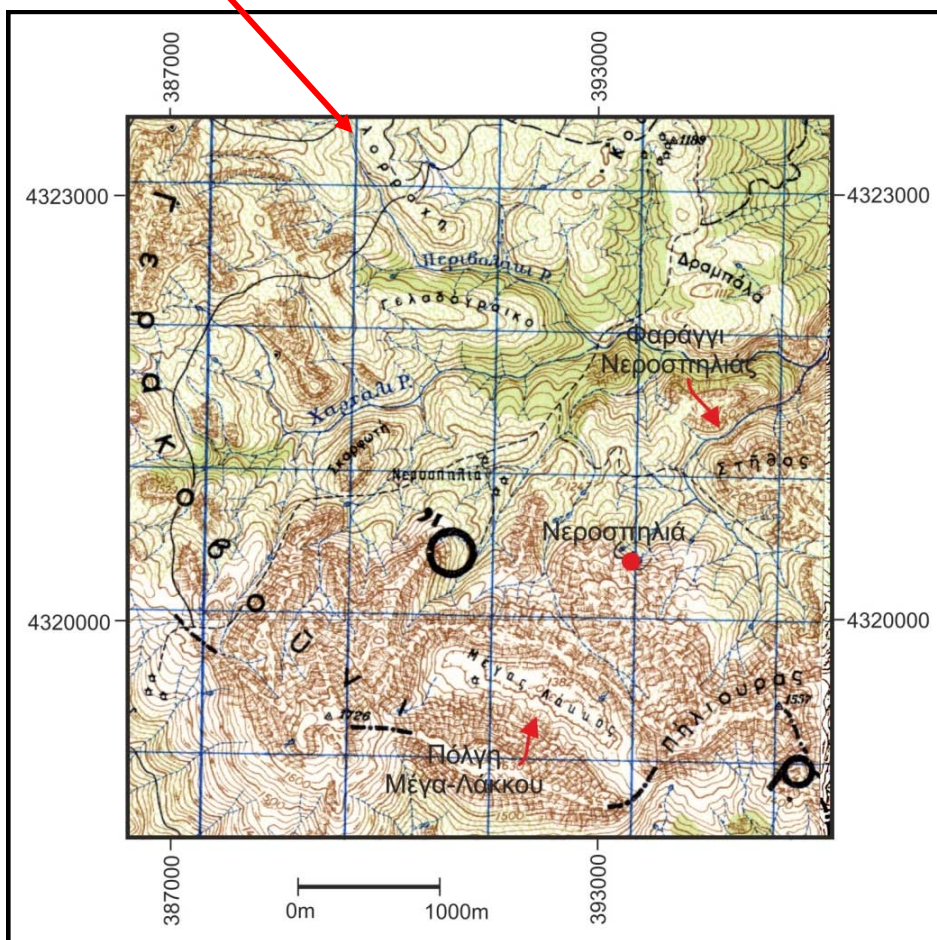
Η μελέτη της χημείας του νερού, συμπληρωματικό αλλά αναπόσπαστο κομμάτι στη μελέτη της εξέλιξης του υπόγειου καρστ και ειδικά της Νεροσπηλιάς, χρησιμοποιήθηκε στην εμπέδωση της λειτουργίας του καρστικού υδροφορέα. Ειδικότερα, για να δειχθεί η σχέση της Νεροσπηλιάς με την πόλγη του Μέγα-Λάκκου πραγματοποιήθηκε πείραμα ιχνηθέτησης.

Με τη βοήθεια των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (ArcView 9.3) κατασκευάστηκαν οι γεωλογικοί χάρτες της περιοχής μελέτης και της Νεροσπηλιάς. Οι χάρτες επεξεργάστηκαν στο σχεδιαστικό πρόγραμμα CorelDraw X5.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε και τα αποτελέσματα της έρευνας αποτελούν ένα χρήσιμο εργαλείο στη μελέτη γενικά των ελληνικών καρστικών υδροφορέων που σχετίζονται με μεγάλους καρστικούς αγωγούς και καταβόθρες.

2. Γεωγραφικά – Μορφολογικά στοιχεία

Το όρος Όθρυς βρίσκεται στο νοτιοανατολικό άκρο της Θεσσαλίας, καταλαμβάνοντας έκταση περίπου 750 km².



Εικόνα 1: Γεωγραφική τοποθέτηση της περιοχής μελέτης (ανατολική Όθρυς).



Εικόνα 2: Τρισδιάστατη απεικόνιση του όρους Όθρυς με τη χρήση ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου (DEM) και την υπέρθεση δορυφορικής εικόνας
LANDSAT 7/ETM+ (2000) |

Το μεγαλύτερο τμήμα της ανήκει διοικητικά στην Περιφέρεια Θεσσαλίας και το νοτιότερο στην περιφέρεια Στερεάς Ελλάδας. Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στα διοικητικά όρια του Δήμου Αλμυρού και του Δήμου Στυλίδας (εικόνα 3).



Εικόνα 3: Η διοικητική τοποθέτηση της περιοχής μελέτης.

Χαρακτηρίζεται από έντονο ανάγλυφο με υψόμετρα που κυμαίνονται από 250m έως 1724m (κορυφή Γερακοβούνι). Άλλες σημαντικές κορυφές είναι το Γκιούζι (1710m), ο Στρατώνας (1653m), ο Πήλιουρας (1557m) και η Μαυρίκα (1552m) (εικόνα 1). Στην έκτασή της συναντώνται εκτεταμένα φαράγγια, χείμαρροι, πολυάριθμα σπήλαια και καρστικές πηγές. Η πιο σημαντική υπόγεια καρστική μορφή της Όθρυς είναι η Νεροσπηλιά, αποτελώντας το μεγαλύτερο υπόγειο ποταμό της Θεσσαλίας. Επίσης, χαρακτηρίζεται από την παρουσία δεκάδων βαράθρων, όπως η Τιτανοσπηλιά, η Γκριζανότρυπα και η Κορακότρυπα.

Στην Όθρυ συναντώνται μεγάλες μórφες καταβάθος διάβρωσης, όπως το φαράγγι του Τσιγγενορρέματος και το φαράγγι του Μαυρομάτη. Σημαντικές καρστικές πηγές, όπως η ίδια η Νεροσπηλιά, η Ανάβρα και η Περδικοβρύση τροφοδοτούν με το νερό τους πολυάριθμους χείμαρρους του βουνού, τα οποία καταλήγουν είτε στον Παγασητικό, είτε στο Μαλιακό κόλπο.

Τα είδη της δασικής χλωρίδας που συναντώνται είναι κυρίως δρυς, έλατα και αειθαλή πλατύφυλλα. Η βλάστηση που αναπτύσσεται στις ασβεστολιθικές πλαγιές της Όθρυς είναι η χαρακτηριστική μεσογειακή μακία, αποτελούμενη από χαμηλούς θάμνους (πυρνάρια).

Ο ορεινός όγκος της Όθρυς χαρακτηρίζεται από πολύ έντονη κατά βάθος διάβρωση κυρίως στο βόρειο τμήμα της (Γαλανάκης, 1997). Η έντονη διάβρωση έχει δημιουργήσει χαρακτηριστικές κοιλάδες σχήματος V και έντονα φαράγγια. Κατά θέσεις έχουμε την ύπαρξη υπολειμματικών ποτάμιων αναβαθμίδων. Η έντονη αυτή κατά βάθος διάβρωση οφείλεται στην τεκτονική ανύψωση της Όθρυς (Γαλανάκης, 1997).

Είναι σημαντική η παρουσία επιπεδωμένων επιφανειών σε όλη την έκταση της Όθρυς. Από το Γαλανάκη (1997) έχει γίνει προσπάθεια προσδιορισμού της ηλικίας των επιφανειών αυτών, με τις επιφάνειες στα 1150-1300m στο Μ-Α Μειόκαινο, στα

870-980m στο Κάτω Πλειόκαινο, στα 700-800m στο Άνω Πλειόκαινο, στα 450-540m στο Κάτω Πλειστόκαινο και στα 350m στο Μέσο Πλειστόκαινο-Ολόκαινο.

Μυθολογία

Η Όθρυς θεωρείται από τους αρχαίους Έλληνες ως το βουνό των Τιτάνων. Στο έργο του "Θεογονία" ο Ησίοδος περιγράφει την Τιτανομαχία, τη δεκάχρονη μάχη μεταξύ των Τιτάνων με ηγέτη τον Άτλαντα και των θεών του Ολύμπου με αρχηγό το γιο του Κρόνου, το Δία.

Ο ετοιμοθάνατος πατέρας του Κρόνου, Ουρανός είχε προφητέψει ότι ένα από τα παιδιά του θα του έπαιρνε την εξουσία. Για το λόγο αυτό ο Τιτάνας Κρόνος άρχισε να καταπίνει τα παιδιά του, που γεννούσε η γυναίκα του, Ρέα. Πρώτα την Εστία, ύστερα τη Δήμητρα και την Ήρα, ύστερα τον Άδη και στη συνέχεια τον Ποσειδώνα.

Η Ρέα εξοργισμένη γέννησε τον τρίτο γιο της το Δία μέσα στο σκοτάδι της νύχτας στο όρος Λύκαιο, στην Αρκαδία, ενώ στη συνέχεια τον έδωσε στις νύμφες Μελία, Αδράστεια, Ιώ και Αμάλθεια για να τον αναθρέψουν στο σπήλαιο Δίκτη στην Κρήτη. Ο Κρόνος έψαξε να τον βρει αλλά εις μάτην, αφού ακόμη και το κλάμα του Δία κρυβόταν από την κρούση των δοράτων των Κουρητών πάνω στις ασπίδες τους.

Μεγαλώνοντας ο Δίας διεκδίκησε την εξουσία μέσα από την Τιτανομαχία. Με τη βοήθεια των θεών του Ολύμπου, των Κυκλώπων και των Εκατόγχειρων κατατρόπωσαν τους Τιτάνες, που είχαν ορμητήριο την ψηλή Όθρυ. Ο Δίας εφοδιασμένος με τον κεραυνό των Κυκλώπων, την περικεφαλαία του Άδη και την τρίαινα του Ποσειδώνα νικά τον πατέρα του Κρόνο. Μεγάλοι βράχοι εκσφενδονίστηκαν προς την Όθρυ από τους Εκατόγχειρες για να καταπλακώσουν του εναπομείναντες Τιτάνες (Ησίοδος, *Θεογονία* 617-885).



Εικόνα 4: Τιτανομαχία. Αναπαράσταση από το αρχαιολογικό μουσείο των Δελφών.

Η Τιτανομαχία τελειώνει με την τροπή των Τιτάνων σε φυγή μετά από την τρομακτική κραυγή του Πάνα. Οι περισσότεροι Τιτάνες και ο Κρόνος, εξορίζονται στα Τάρταρα, ενώ ο αρχηγός τους, Άτλαντας καταδικάζεται να κρατάει αιώνια τον ουρανό.

Τα Τάρταρα πιθανώς να τοποθετούνται στα έγκατα της Όθρυος, λόγω της ύπαρξης πολυάριθμων βαράθρων. Τα ρεύματα αέρα που εξέρχονται στα στόμια των βαράθρων πιθανόν να ώθησαν τους ανθρώπους να τοποθετήσουν στο βάθος τους απομονωμένες θεότητες, όπως τους Τιτάνες.

3. Γεωλογικά Στοιχεία

Τα Αλπικά πετρώματα, τα οποία συναντώνται στην περιοχή μελέτης ανήκουν στην Υποπελαγονική ζώνη. Η ονομασία αυτής της ζώνης υποδηλώνει, σύμφωνα με τον Aubouin, 1959 (από Μουντράκη, 1985) την στενή της σχέση με την Πελαγονική ζώνη.

Παλαιογεωγραφικά, η Υποπελαγονική ζώνη τοποθετείται ως η δυτική κατωφέρεια της Πελαγονικής προς τον ωκεάνιο χώρο που αντιπροσωπεύουν τα πετρώματα της ζώνης Πίνδου. Ένα από τα σημαντικά χαρακτηριστικά της Υποπελαγονικής ζώνης είναι οι μεγάλες οφιολιθικές μάζες και η σχιστοκερατολιθική διάπλαση. Η τοποθέτηση των οφιολίθων πάνω σε νηριτικά ή σε πελαγικά ιζήματα αποτελεί σημαντική απόδειξη για την προαναφερθείσα άποψη της θέσης της Υποπελαγονικής ζώνης ως κατωφέρεια της Πελαγονικής. Η σημερινή γεωτεκτονική αντίληψη θεωρεί ότι οι οφιόλιθοι αυτής της ζώνης αποτελούν την οφιολιθική συρραφή της παλιάς ωκεάνιας περιοχής που βρισκόταν Δυτικά του Πελαγονικού ηπειρωτικού τεμάχους, λόγω του ότι αποτελούν την εξωτερική οφιολιθική λωρίδα της Ελλάδας (ERO). Οι οφιόλιθοι της Όθρυς αποτελούν μανδυακό υλικό μεσοωκεάνιας ράχης στον ωκεανό της Τηθύος μεταξύ της Γκοντβάνας και της Ευρασίας (Barth et al, 2008).

Επίσης, οι ωκεάνιοι χαρακτήρες που συναντώνται στο όρος Όθρυς είναι άλλη μία ένδειξη ότι η ζώνη αυτή ήταν τμήμα ενός ωκεάνιου χώρου, πιθανόν μαζί με τη ζώνη Πίνδου (Μουντράκης, 1985).

Οι βασικές λιθοστρωματογραφικές ενότητες της Υποπελαγονικής ζώνης είναι τα Τριαδικά ιζήματα, η σχιστοκερατολιθική διάπλαση με τους οφιολίθους, οι ασβεστόλιθοι του Ιουρασικού και τα ιζήματα της Μέσω-Άνω Κρητιδικής επίκλυσης.

Λιθοστρωματογραφία της περιοχής

Στην περιοχή μελέτης συναντώνται όλες οι βασικές λιθοστρωματογραφικές ενότητες της Υποπελαγονικής ζώνης.

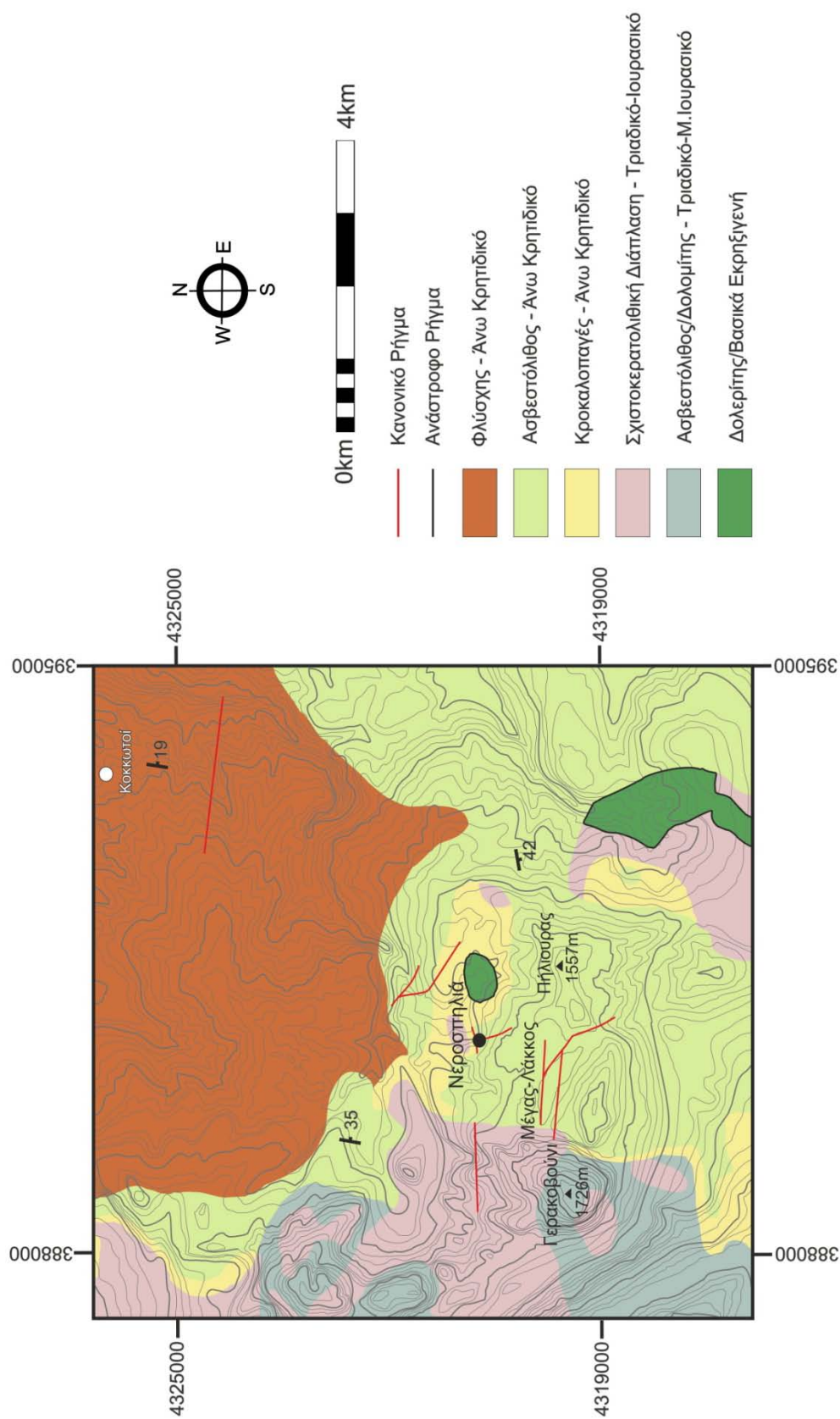
A. Τριαδικά ιζήματα

Πρόκειται για το προ-οφιολιθικό υπόβαθρο με ανθρακικά ιζήματα. Οι κατώτερες σειρές αποτελούνται από ασβεστόλιθους, κροκαλοπαγή, ψαμμίτες με παρεμβολές τοφικών υλικών. Ενδιάμεσες σειρές αποτελούνται από ασβεστόλιθους Κ-Μ Τριαδικού και οι Ανώτερες με τεφρούς ασβεστόλιθους και δολομίτες.

B. Σχιστοκερατολιθική διάπλαση με οφιόλιθους

Ένας από τους πιο σημαντικούς σχηματισμούς της Υποπελαγονικής ζώνης είναι η σχιστοκερατολιθική διάπλαση, η οποία αποτελείται από λεπτόκοκκα ιζήματα (πράσινους, κόκκινους, μαύρους αργιλικούς σχιστόλιθους, ραδιολαριτικούς κερατόλιθους, μάργες, λεπτόκοκκους ψαμμίτες, πηλίτες, αργιλοπηλίτες και παρεμβολές λεπτόκοκκων πελαγικών ασβεστόλιθων).

Σε ορισμένες περιοχές η απόθεση της σχιστοκερατολιθικής διάπλασης κράτησε όλο το Ιουρασικό και γινόταν σε συνεχείς εναλλαγές. Η ιζηματογένεση της είναι πελαγική-ωκεάνια (Μουντράκης, 1985).



Εικόνα 5: Τροποποιημένος γεωλογικός χάρτης της ανατολικής Όθρας που προήλθε από την ψηφιοποίηση των φύλλων χάρτη Αλμυρού, Ανάβρα, Μύλοι και Στυλίδας (Ι.Γ.Μ.Ε.), κλίμακας 1:50000.

Συχνά, συναντώνται συμπυκνωμένα μέσα στη σχιστοκερατολιθική διάπλαση μικρά ή μεγάλα οφιολιθικά σώματα, γνωστή ως «σχιστοκερατολιθική με οφιόλιθους διάπλαση». Άλλες φορές χαρακτηρίζεται ως ηφαιστειοϊζηματογενής σειρά εξαιτίας των διεισδύσεων βασικών ηφαιστιτών, όπως δολερίτες, και βασικών τόφφων.

Στη βάση της σχιστοκερατολιθικής διάπλασης χαρακτηριστική είναι η ύπαρξη των «*mélanges*» (τεκτονικά οφιολιθικά μίγματα). Σε όλη την Όθρυ, εμφανίζονται πλήρεις οφιολιθικές ακολουθίες με όλα σχεδόν τα βασικά και υπερβασικά πετρώματα, πλουτωνικά και ηφαιστειακά (Μουντράκης, 1985). Τα κυριότερα οφιολιθικά πετρώματα που συναντώνται σε όλη τη μάζα της Όθρυς είναι σερπεντινίτες, χαρτσβουργίτες, δουνίτες, λερζόλιθοι, νορίτες, γάββροι, δολερίτες, βασάλτες, *pillow lavas* (Μουντράκης, 1985).

Γ. Ασβεστόλιθοι Ιουρασικού

Στην Υποπελαγονική συχνά παρατηρείται η τεκτονική τοποθέτηση των οφιολίθων πάνω σε ανθρακικά πετρώματα του Ιουρασικού. Τα πετρώματα αυτά είναι πελαγικοί ή νηριτικοί ασβεστόλιθοι με εναλλαγές κερατολίθων και αργιλικών υλικών.

Δ. Ιζήματα της Μέσο-Ανω Κρητιδικής επίκλυσης

Κατά το Ανώτερο Ιουρασικό – Κ. Κρητιδικό, η Πελαγονική ζώνη αναδύεται και η περιοχή χερσεύει με την επίκλυση της θάλασσας κατά το Κενομάνιο δημιουργείται ένα τυπικό κροκαλοπαγές βάσης και μετά αποτίθενται ασβεστόλιθοι του Άνω Κρητιδικού, νηριτικοί ή πελαγικοί. Στη μάζα των νηριτικών ασβεστολίθων συναντώνται απολιθώματα ρουδιστών. Η ιζηματογένεση ολοκληρώνεται με την απόθεση του φλύσχη από Άνω Μαιστρίχτιο μέχρι το τέλος Ηωκαίνου.

Μεταλπικά ιζήματα

Στη περιοχή μελέτης παρατηρείται πλήρωση των τεκτονικών βυθισμάτων με μεταλπικά ιζήματα. Αυτά αποτελούν κυρίως Πλειο-Πλειστοκαινικές αργιλοαμμώδεις αποθέσεις και πλευρικά κορήματα. Στις περιοχές εκφόρτισης καρστικών πηγών παρατηρούνται μικρής έκτασης τραβερτινικές αποθέσεις.

4. Καρστική Γεωμορφολογία

Καρστ είναι ο γεωμορφολογικός όρος, που περιγράφει έναν ιδιαίτερο τύπο επιφανειακής και υπόγειας μορφολογίας, ο οποίος προκύπτει από τη διαλυτική δράση του νερού σε ανθρακικά πετρώματα, όπως ο ασβεστόλιθος, το μάρμαρο και η γύψος. Το καρστ περιλαμβάνει ένα σύμπλεγμα επιφανειακών και υπόγειων καρστικών μορφών που εμφανίζουν ιδιαίτερα γεωμορφολογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά. Ο όρος καρστ προέρχεται από την περιοχή Kras, η οποία βρίσκεται στα σύνορα της Σλοβενίας με την Ιταλία και αποτελείται από ανθρακικά πετρώματα. Το όνομα της είναι αποτέλεσμα της γλωσσικής εξέλιξης Kar(r)a – Kars – Kras (Ford & Williams, 2007). Υπάρχει και η άποψη ότι ο όρος Καρστ προέρχεται από την λέξη Karra/gara, που σημαίνει «βράχος», η προέλευση της οποίας είναι Ινδό-ευρωπαϊκή (Gams, 1973, Kranjic, 2001).

4.1 Καρστική διάβρωση

Το ανάγλυφο της γης διαμορφώνεται από τους ενδογενείς και εξωγενείς δυναμικούς παράγοντες. Οι ηπειρωτικές και οι ορογενετικές διαδικασίες ανήκουν στους ενδογενείς παράγοντες. Ο πιο σημαντικός από τους εξωγενείς παράγοντες είναι η αποσάθρωση.

Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η καρστική εξέλιξη εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως είναι το είδος του καρστικού πετρώματος (ασβεστόλιθος, γύψος κ.α.), η έκταση που θα αναπτυχθεί το καρστ και το βάθος του ενταφιασμού του καρστ. Η αρχή της καρστικής εξέλιξης είναι η χημική διάλυση και η αποσάθρωση των καρστικών πετρωμάτων, δηλαδή το σύνολο των φαινομένων που προκαλούνται από τη δράση της ηλιακής ενέργειας και της βαρύτητας και οδηγούν στην καταστροφή των πετρωμάτων. Η αποσάθρωση διακρίνεται σε χημική και φυσικομηχανική. Γενικά, τα στάδια που χαρακτηρίζουν την εξέλιξη του καρστ είναι τέσσερα: η διάλυση, η αποσάθρωση, η μεταφορά και η απόθεση.

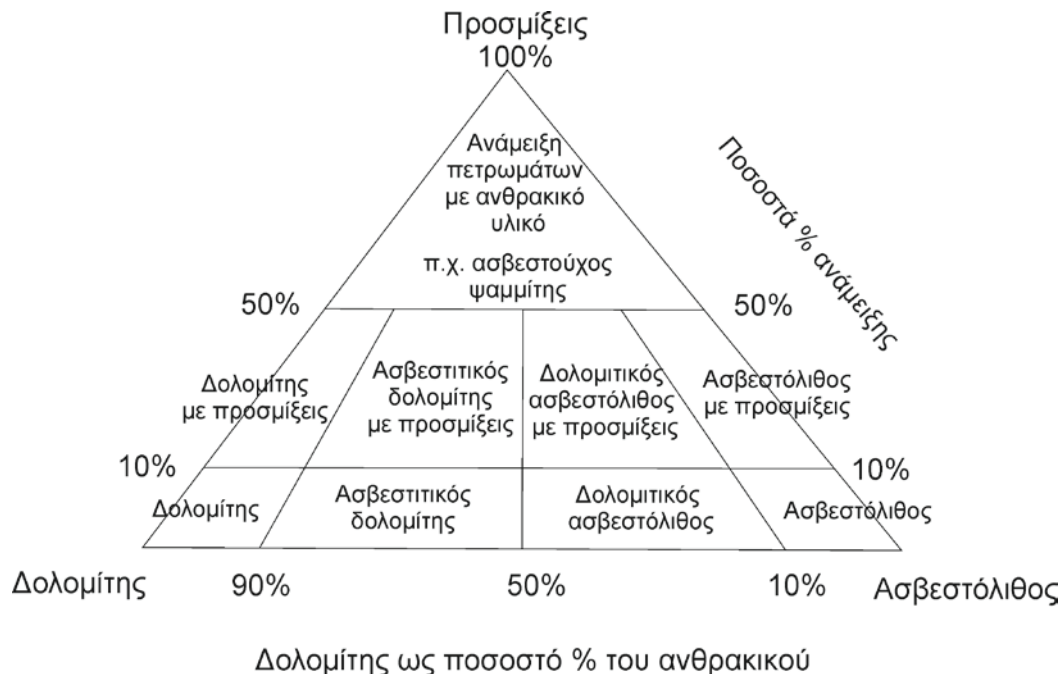
Η χημική διάλυση αρχίζει στην επιφάνεια των καρστικών πετρωμάτων, τα οποία δεν είναι εντελώς ομοιογενή και για αυτό υπάρχουν συχνά πολλές ρωγμές και ρήγματα, μέσω των οποίων εισχωρεί και στα βαθύτερα στρώματα από την επιφάνεια της γης.

Κατά την χημική αποσάθρωση προκαλείται μεταβολή της χημικής σύστασης ενός ή περισσότερων ορυκτών του πετρώματος, συνήθως από το νερό ή από τα σε διάλυση συστατικά του, ενώ κατά τη μηχανική ή φυσική διαταράσσεται η συνοχή και οι μηχανικές ιδιότητες αυτού χωρίς τη μεταβολή της χημικής σύστασης. Κατά τη διαδικασία της εξέλιξης του καρστ, το υλικό μεταφέρεται, είτε ως ομογενές είτε ως ετερογενές διάλυμα, και καθιζάνει σε περιοχές όπου μειώνεται η κινητική ενέργεια ροής του νερού.

Τα καρστικά πετρώματα, τα οποία είναι ιδιαίτερα ευάλωτα στη δράση του νερού είναι:

- Οι ασβεστόλιθοι (CaCO_3), οι οποίοι καλύπτουν το 10-20% της επιφάνειας της γης.
- Οι δολομίτες ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), οι οποίοι σε αντίθεση με τους ασβεστόλιθους, καρστικοποιούνται με μεγαλύτερο βαθμό δυσκολίας.
- Η γύψος (CaSO_4), η οποία αναπτύσσεται σε διάφορα περιβάλλοντα, όπως λιμνοθαλάσσιο περιβάλλον.
- Ο ανυδρίτης, ο οποίος μαζί με τη γύψο είναι ιδιαίτερα διαλυτοί.

- Τα αλατούχα πετρώματα, τα οποία υπάρχουν σε ξηρές περιοχές της επιφάνειας της γης, αποτελούν από τα πιο ευδιαλυτά πετρώματα.
- Τα ανθρακικά μεταμορφωμένα πετρώματα (μάρμαρο)
- Τα ιζηματογενή πετρώματα, τα οποία περιέχουν ανθρακικά ορυκτά, όπως τα κλαστικά ιζήματα.



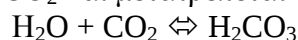
Σχήμα 1: Ταξινόμηση ασβεστολιθικών – δολομιτικών πετρωμάτων (από Γκολούμποβιτς, 2011).

Χημική διάλυση του ασβεστόλιθου

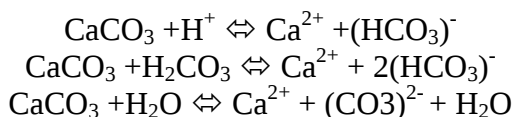
Ο βασικός παράγοντας καρστικοποίησης, κατά τη χημική διάλυση του ασβεστόλιθου, είναι το νερό. Πιο αναλυτικά, το νερό γίνεται ένα ισχυρό διαλυτικό μέσο όταν εμπλουτίζεται με CO₂, από την ατμόσφαιρα ή το έδαφος, λόγω της αποσυνθέσεως των οργανικών ουσιών. Η ικανότητα του νερού να προσλαμβάνει το διοξείδιο του άνθρακα εξαρτάται από τη θερμοκρασία του νερού (μεγάλος βαθμός διάλυσης σε χαμηλές θερμοκρασίες). Στη συνέχεια διαλύει τα ανθρακικά άλατα του ασβεστίου και του μαγνησίου, τα οποία μετατρέπονται σε διαλυτά όξινα ανθρακικά άλατα. Στη συνέχεια, το ανθρακικό οξύ (H₂CO₃), επιδρά στον ασβεστίτη (CaCO₃), με παραγόμενο το δισόξινο ανθρακικό ασβέστιο. Το δισόξινο ανθρακικό ασβέστιο μεταφέρεται διαλυμένο στο νερό. Κατά τη μεταφορά του ελευθερώνει διοξείδιο του άνθρακα και νερό, και έτσι γίνεται η απόθεση (καθίζηση) του ασβεστίτη. Η διαδικασία καλείται *καρστική διάβρωση*.

Οι αντιδράσεις που γίνονται είναι οι εξής:

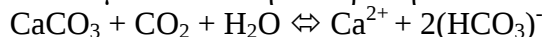
1) Το νερό προσλαμβάνει το CO₂ και μετατρέπεται σε ανθρακικό οξύ:



2) Το νερό που περιέχει CO₂ θα αντιδράσει με τον ασβεστόλιθο σύμφωνα με τις αντιδράσεις:



Οι οποίες συνδυάζονται σε μία συνολική αντίδραση:



Η χημική σύσταση ενός καθαρού ασβεστιτικού πετρώματος είναι 56% CaO και CO₂. Επίσης, οι ασβεστόλιθοι, λόγω των προσμίξεων ενώσεων οξειδίων και υδροξειδίων του σιδήρου κ.α., παρουσιάζονται σε διαφόρους χρωματισμούς του πετρώματος. Επίσης, το χρώμα ενός ανθρακικού πετρώματος οφείλεται και σε άλλους παράγοντες όπως το περιβάλλον της απόθεσης και το ποσό του οργανικού υλικού. Αναλυτικά, όταν η απόθεση των ιζημάτων των ανθρακικών πετρωμάτων, γίνεται σε ρηχά νερά, δηλαδή ένα περιβάλλον με χαμηλό οξυγόνο και με οργανικό υλικό, πιθανώς να ενίσχυαν ένα γκρίζο ή μαύρο χρώμα. Ενώ, όταν η απόθεση γίνεται σε βαθύτερα νερά, τότε μπορεί να είναι ρόδινα ή πορφυρά, μέσω της συντήρησης των χρωστικών ουσιών οξειδίων σιδήρου και μαγγανίου.

Χημική διάλυση του δολομίτη

Η χημική διάλυση του δολομίτη γίνεται όπως και του ασβεστόλιθου. Συγκεκριμένα ο δολομίτης περιέχει πάνω από 15% MgO, ενώ όταν είναι 5-15% τότε ονομάζονται μαγνησιούχος ασβεστόλιθος.

Χημική διάλυση της γύψου

Η διάλυση του θεικού άλατος γίνεται με διαφορετικούς μηχανισμούς και διαφορετικά ποσοστά σε σχέση με τη διάλυση των ασβεστολίθων. Η γύψος διαλύεται σε ένα απλό διαχωρισμό σε δύο φάσεις:



Η διαλυτότητα της γύψου σε καθαρό νερό στους 20°C είναι 2.531 g/l, συγκριτικά με τη διαλυτότητα του ασβεστίτη, μειώνεται από 10 έως 30 φορές, εάν ο ασβεστίτης διαλύεται με την παρουσία του CO₂ (Klimchouk and Ford, 2000).

Οι κύριοι παράγοντες που επιδρούν στην καρστική διάβρωση είναι η κατάλληλη τεκτονική κατασκευή της περιοχής, η θέση των διαλυτών πετρωμάτων σε σχέση με την επιφάνεια, η κλίση της επιφάνειας του εδάφους, οι κλιματολογικές συνθήκες, η χημική σύσταση των πετρωμάτων, που επηρεάζει το πόσο πορώδες μπορεί να είναι το πέτρωμα και η υψηλή βιολογική δραστηριότητα, το λεγόμενο «φυτοκάρστ».

4.2 Επιφανειακές καρστικές μορφές

Οι καρστικές μορφές κατανέμονται σε επιφανειακές και υπόγειες. Συγκεκριμένα κατανέμονται ως εξής:

Επιφανειακές καρστικές μορφές:

- Μεγάλες Καρστικές Μορφές
 - Δολίνες
 - Ουβάλες
 - Πόλγες

- Μικρές Καρστικές μορφές
 - Κοιλώματα διάλυσης (Kamenitzas)
 - Επιφανειακές Χύτρες (effluent runnels)
 - Δαχτυλογλυφές (Rillenkarrren)
 - Αυλακοειδείς Γλυφές (Rinnenkarrren)
 - Μαιανδροειδείς Γλυφές (Meanderkarrren)
 - Γλυφές τοιχωμάτων (Wandkarrren)
 - Ίχνη βροχής (Rainpits)

4.2.1. Μεγάλες επιφανειακές καρστικές μορφές

Δολίνες

Η δολίνη είναι μία κλειστή κυκλική εκβάθυνση σε μία καρστική περιοχή. Η διάμετρος του κοιλώματος κυμαίνεται μεταξύ μερικών εκατοστών και εκατοντάδων μέτρων, με βάθος μέχρι 100m. Οι κλίσεις των τοιχωμάτων των δολινών χαρακτηρίζονται από ήπιες έως κατακόρυφες, ενώ τα χαμηλότερα σημεία τους είναι συχνά κοντά στο κέντρο τους, ενώ μπορεί να είναι και κοντά στις πλευρές τους.

Σύμφωνα με το Nicod (1976) οι δολίνες σε ασβεστόλιθο δεν συνεχονται σε μεγάλο βάθος, αλλά οι δολίνες, οι οποίες είναι κάτω από το έδαφος συνεχίζουν ακόμα και σήμερα να αναπτύσσονται.

Η ταξινόμηση των δολινών μπορεί να γίνει με βάση την λιθολογία τους, όπως δολίνες ασβεστόλιθων, δολίνες γύψου κ.α., με βάση τα γεωλογικά στρώματα και τον τεκτονισμό που επικρατεί στην συγκεκριμένη περιοχή, όπου εμφανίζεται η δολίνη.

Το μεγαλύτερο ποσοστό των δολινών συνδέεται άμεσα με το υπόγειο καρστικό σύστημα. Πολλές δολίνες λειτουργούν ως σημεία εισόδου του νερού στη ζώνη κατείσδυσης, διοχετεύοντας το στο καρστικό υδροφορέα. Οι όροι δολίνη και καταβόθρα ουσιαστικά περιγράφουν τον ίδιο καρστικό σχηματισμό, ο πρώτος το επιφανειακό του τμήμα και ο δεύτερος το υπόγειο του.

Ουβάλες

Οι ουβάλες αποτελούν την εξέλιξη των δολινών, δηλαδή η δημιουργία τους οφείλεται στην συνένωση δολινών, λόγω της συνεχούς διάβρωσης και διάλυσης του πετρώματος. Στη βάση μιας ουβάλας μπορεί να υπάρχει υπολειμματικό ασβεστολιθικό πέτρωμα, το οποίο προκύπτει λόγω της μείωσης του χάσματος που υπήρχε στις χωρισμένες δολίνες. Καθώς τα χωρίσματα των δολινών διαβρώνονται, μειώνεται το ύψος τους ενώ οι πυθμένες των διαφόρων δολινών, οι οποίοι έχουν ενωθεί, έχουν συνήθως κυματοειδές σχήμα. Το μήκος και το πλάτος των ουβαλών εκτείνεται από μερικές δεκάδες μέτρα μέχρι και χιλιόμετρα και συνήθως αποτελεί το μεταβατικό στάδιο ανάμεσα στις δολίνες και τις πόλγες.

Πόλγες

Οι πόλγες, σύμφωνα με τον Gams, (1973) είναι μεγάλες κλειστές καρστικές λεκάνες με επίπεδο πυθμένα, με απότομες κλίσεις στις πλαγιές τους και με αποστράγγιση των επιφανειακών νερών. Γενικά, οι πόλγες είναι επιμηκυσμένες και κλειστές ή ημίκλειστες καρστικές μορφές. Στον πυθμένα κάθε πόλγης, υπάρχει συγκέντρωση αργιλικού υλικού, το μήκος και το πλάτος της κυμαίνεται μεταξύ χιλιομέτρου και δεκάδων χιλιομέτρων, ενώ το βάθος μέχρι και εκατοντάδες μέτρα.

4.2.2 Μικρές επιφανειακές καρστικές μορφές

► Κοιλώματα διάλυσης (Kamenitzas)

Τα κοιλώματα διάλυσης ή Kamenitzas (από την Σλαβική λέξη Kamenica), είναι κλειστές κοιλότητες, οι οποίες αναπτύσσονται στην επιφάνεια του καρστ (Gines, et al., 2009). Η παρουσία στατικού νερού, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μικρών, στρογγυλών και κλειστών κοιλωμάτων. Συνήθως αναπτύσσονται σε οριζόντιες επιφάνειες ή με μικρή κλίση σε κυματιστές επιφάνειες, έτσι ώστε να μην μπορεί να γίνει η ροή του νερού. Ο πυθμένας τους είναι επίπεδος και οριζόντιος, αλλά μερικές φορές μπορεί να έχει απότομες προεξοχές. Η διάμετρος των κοιλωμάτων διάλυσης, μπορεί να είναι από 4-5cm μέχρι 1-2m, έχει βρεθεί να ξεπερνάει τα 6 m, ενώ το βάθος τους μπορεί να είναι από 10mm μέχρι και 1m.

► Επιφανειακές Χύτρες (Effluent Runnels)

Οι Επιφανειακές Χύτρες (Effluent Runnels) δημιουργούνται όταν στην επιφάνεια υπάρχει μία μικρή εκβάθυνση και στη συνέχεια πληρωθεί με βρόχινο νερό, το οποίο όμως μπορεί να υπερχειλίσει από το ένα περιθώριο του κοιλώματος, και έτσι να προκύψουν οι συγκεκριμένες καρστικές μορφές (εικόνα 6).

Δημιουργείται σε δύο φάσεις, κατά την πρώτη λόγω της ύπαρξης βρόχινου νερού μέσα στο κοίλωμα, αρχίζει η διάβρωση των πλευρών του κοιλώματος και ακολουθεί η απογύμνωση του πετρώματος. Στη δεύτερη φάση το κοίλωμα διευρύνεται πλευρικά, στη βάση του κοιλώματος υπάρχουν πεσμένα τεμάχια, λόγω της διάβρωσης και οργανικό και εδαφικό υλικό, με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν μικρές εγκοπές, συνοδευόμενες από την εκροή του νερού (Gines, et al., 2009).

Στη συνέχεια, λόγω της εκροής του νερού, μειώνεται η πλευρά του κοιλώματος και έτσι διοχετεύεται έξω από το κοίλωμα, με αποτέλεσμα το σχηματισμό των επιφανειακών χύτρων (effluent runnels).



Εικόνα 6: Αποψη επιφανειακής χύτρας - effluent runnel (από Gines et al, 2009).

► **Δαχτυλογλυφές (Rillenkarren - Solution Flutes)**

Τα Rillenkarren είναι μικρά ρηγά κανάλια, που δημιουργούνται άμεσα από την πρόσκρουση της σταγόνας του νερού της βροχόπτωσης, σε διαλυτά πετρώματα όπως είναι ο ασβεστόλιθος και σε επιφάνειες με μεγάλη κλίση (από 40° μέχρι και 80°). Το μήκος τους εξαρτάται από την κλίση της επιφάνειας, που δημιουργούνται και συνήθως είναι 100 - 300mm, το πλάτος τους είναι 12 - 25mm και το βάθος τους είναι 2 - 6mm.



**Εικόνα 7: Παρατήρηση δαχτυλογλυφών (Rillenkarren – solution flutes).
(από Βαξεβανόπουλος Μ., 2003)**

► **Αυλακοειδείς Γλυφές (Rinnenkarren - Solution Channels)**

Τα rinnenkarren είναι οι γλυφές, οι οποίες έχουν σχήμα αυλακιών, με απότομα τοιχώματα και με επίπεδο πυθμένα στον οποίο συγκεντρώνεται το τρεχούμενο νερό. Η ύπαρξη μεγάλης ποσότητας νερού, έχει ως αποτέλεσμα την μεγαλύτερη εκβάθυνση των rinnenkarren. Σπάνια δημιουργούνται κάτω από την εδαφική κάλυψη.



**Εικόνα 8: Δημιουργία των αυλακοειδών γλυφών (rinnenkarren – solution channels).
(από Gines et al, 2009)**

► Μαιανδρώδεις Γλυφές (Meanderkarren)

Οι μαιανδρώδεις γλυφές (Meanderkarren) είναι ένας ειδικός τύπος των rinnenkarren. Αποτελούν γλυφές με μορφή αυλακιών και το σχήμα τους είναι ελικοειδής. Όταν η ταχύτητα της ροής του νερού είναι χαμηλή, τότε αναπτύσσονται τα Meanderkarren (Ford & Williams, 1989).

► Τοιχώματα διάλυσης (Wandkarren)

Τα Wandkarren (wall solutional runnels) δημιουργούνται σε επιφάνειες με κλίση εξαιτίας τη ροή του νερού. Είναι παράλληλα το ένα με το άλλο και έχουν ημικυκλική τομή (Bogli, 1960) Αναπτύσσονται σε κάθετα τοιχώματα (για παράδειγμα τα τοιχώματα ενός πηγαδιού). Επίσης, σε περιοχές που έχουν αναβαθμίδες, όπως τα περιθώρια της πόλγης ή της δολίνης.

► Ίχνη βροχής (Rainpits)

Αυτές οι μορφές καρστικής διάλυσης αποτελούν μικρές κοιλότητες διαμέτρου μέχρι και 1cm και δημιουργούνται από σταγόνες βροχής οι οποίες δε ρέουν και διαλύουν τοπικά το πέτρωμα.

4.3 Υπόγειες καρστικές μορφές

Οι υπόγειες καρστικές μορφές θεωρούνται το αποτέλεσμα της καρστικής διάλυσης. Πρόκειται για αγωγίμους από το καρστικό νερό χώρους, οι οποίοι διευρύνουν τις διαστάσεις τους όσο προχωράει η καρστική διάλυση. Βασική προϋπόθεση της ύπαρξης τους είναι η υπόγεια διάλυση να είναι ταχύτερη της επιφανειακής (Palmer, 2003).

Οι αγωγοί, οι οποίοι βρίσκονται ακριβώς κάτω από τις δολίνες και απάγουν το νερό τους ή γενικά σε σημεία του επιφανειακού καρστ όπου διοχετεύεται νερό ονομάζονται *καταβόθρες*. Η εξέλιξη τους οδηγεί σε μορφές που τις περισσότερες φορές δεν έχουν σχέση με κατείσδυση μεγάλων ποσοτήτων νερού και ονομάζονται *καρστικά φρέατα – βάραθρα*. Τα βάραθρα αποτελούν υποκατηγορία των σπηλαίων. Ως *σπήλαιο* ονομάζουμε το υπόγειο έγκοιλο στο οποίο έχει πρόσβαση ο άνθρωπος διαμέσου εισόδου – στομίου. Οι κενοί καρστικοί χώροι στους οποίους δεν έχει πρόσβαση ο άνθρωπος και αποτελούν μέρος του υπόγειου καρστικού συστήματος

ονομάζονται *έγκοιλα*. Τα έγκοιλα μπορεί να είναι πληρωμένα με νερό ή ιζήματα. Συνολικά οι υπόγειες καρστικές μορφές είναι οι εξής:

- Καταβόθρες
- Καρστικά φρέατα-Βάραθρα
- Σπήλαια
- Υπόγειοι Οχετοί
- Έγκοιλα

4.3.1 Σπηλαιογένεση

Η σπηλαιογένεση και ειδικότερα οι σπηλαιογενετικές θεωρίες προσπαθούν να εξηγήσουν τον τρόπο με τον οποίο δημιουργούνται τα σπήλαια. Ο πιο αποδεκτός ορισμός για το σπήλαιο θεωρείται κάθε φυσική κοιλότητα αναπτυσσόμενη στο εσωτερικό των πετρωμάτων, με διαστάσεις που να επιτρέπουν την είσοδο του ανθρώπου και η οποία επικοινωνεί με την επιφάνεια της γης διαμέσου στομίου. Η δημιουργία των σπηλαίων εμπεριέχει σύνθετα στοιχεία που αγγίζουν τη γεωλογία, τη χημεία και την υδρολογία του υπόγειου νερού. Οι περισσότερες θεωρίες σπηλαιογένεσης αφορούν στα σπήλαια από διάλυση, δηλαδή τα καρστικά.

Οι τρεις βασικές θεωρίες για το πρόβλημα της γένεσης των σπηλαίων, οι οποίες αναπτύχθηκαν από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα, ουσιαστικά τοποθετούσαν υδρογεωλογικά την περιοχή όπου λαμβάνει χώρα η σπηλαιογένεση. Αυτές οι περιοχές είναι η ζώνη κατείσδυσης του επιφανειακού νερού, η βαθειά φρεατική ζώνη και το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα (σχήμα 2).

1. Ζώνη Κατείσδυσης (Vadose Zone)

Αρχικά οι θεωρίες περί σπηλαιογένεσης τοποθετούσαν την περιοχή δημιουργίας των σπηλαίων στη ζώνη κατείσδυσης. Αυτό εξηγείται διότι οι παρατηρήσεις του 19^{ου} και 20^{ου} αιώνα πραγματοποιούνταν σε κατεισδύοντες στο καρστ ποταμούς.

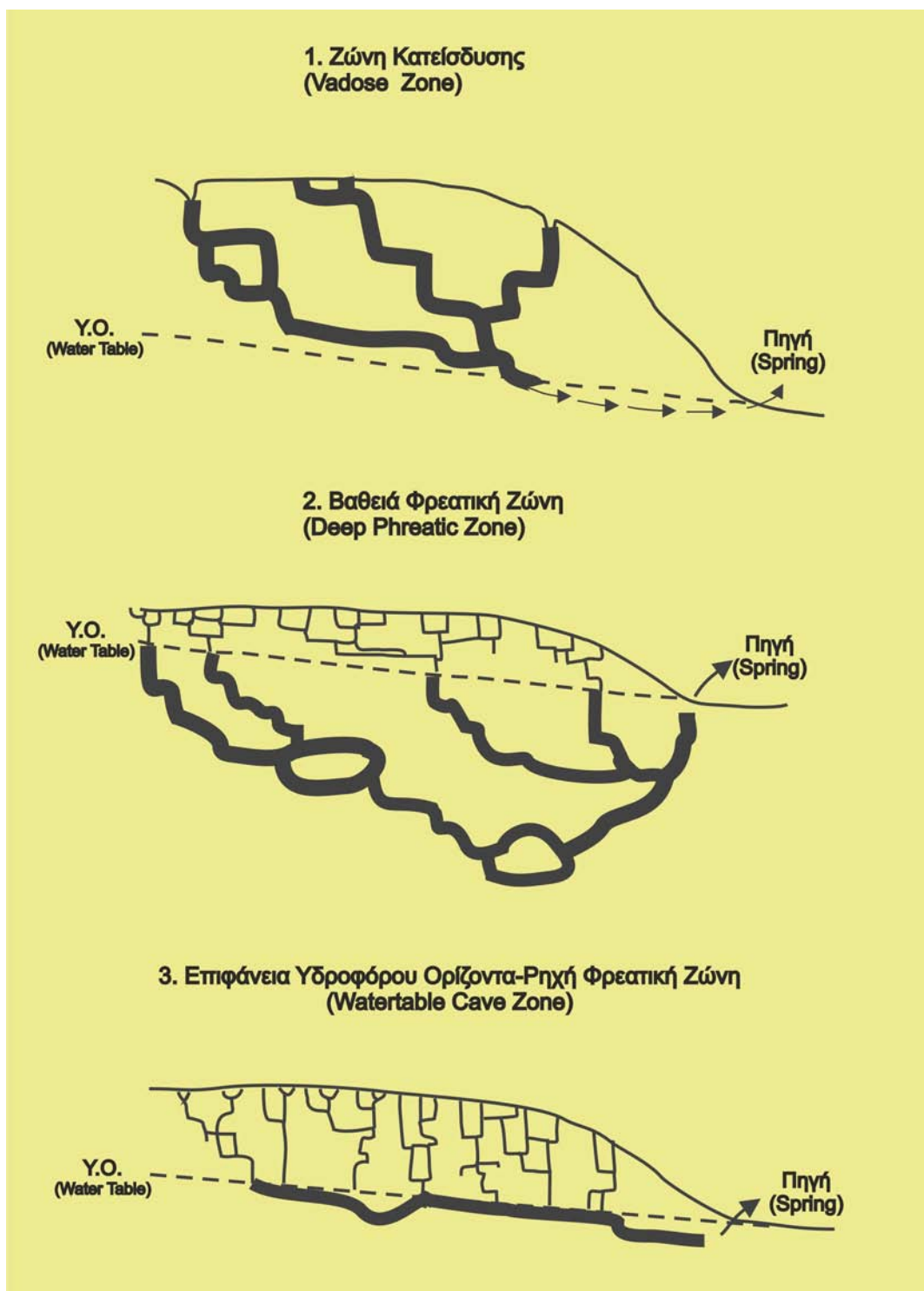
2. Βαθειά Φρεατική Ζώνη (Deep Phreatic Zone)

Οι Cvijic (1918), Grund (1903), Davis (1930) και Bretz (1942) (από Ford, 2003) θεώρησαν ότι τα σπήλαια δημιουργούνται σε βάθος μέσα στον υδροφόρο ορίζοντα. Το μοντέλο αυτό της σπηλαιογένεσης στηριζόταν κυρίως σε εμπειρικές παρατηρήσεις σπηλαιολόγων, μιας και πλήθος σπηλαίων εμφάνιζαν μορφές δημιουργημένες στη βαθειά φρεατική ζώνη (Βαξεβανόπουλος 2007). Ειδικά ο Grund το 1903 υποστήριζε τη διάχυση του νερού μέσα στο καρστικό σύστημα και τη μη ύπαρξη διακριτών καρστικών αγωγών. Αργότερα οι Walter Von Knebel (1906), Freidrich Katzer (1909) και E.A.Martel (1921) (από Ford, 2003) υποστήριζαν την ύπαρξη καρστικών αγωγών μέσα στο υπόγειο σύστημα παρατηρώντας τη διείσδυση ποταμών και την πλήρωση με νερό σπηλαίων.

3. Επιφάνεια Υδροφόρου Ορίζοντα - Ρηχή Φρεατική Ζώνη

Αργότερα μεταξύ 1930 και 1942 αμερικανοί γεωλόγοι προσπάθησαν να ερμηνεύσουν τη σπηλαιογένεση σε σχέση με τις διακυμάνσεις της επιφάνειας του υδροφόρου ορίζοντα.

Η διακύμανση του υδροφόρου ορίζοντα κυμαίνεται ανάλογα με τον όγκο του υπογείου νερού και η κύρια σπηλαιογένεση γίνεται σε αυτή τη ζώνη με μικρότερες ζώνες πάνω και κάτω από την επιφάνεια του υδροφόρου. Ωστόσο η επιφάνεια του υδροφόρου ορίζοντα θα πρέπει να μένει σχετικά στο ίδιο επίπεδο για αρκετό χρονικό διάστημα. Στη ζώνη κατείσδυσης η σπηλαιογένεση είναι μικρότερου βαθμού και απλά τροφοδοτεί με νερό τη φρεατική (Βαξεβανόπουλος, 2007).



**Σχήμα 2: Άποψη των τριών επιμέρους θεωριών σπηλαιογένεσης.
(τροποποίηση από Ford, 2003)**

Ο Ford (2003) προσπάθησε να εξηγήσει τη διαδικασία της σπηλαιογένεσης ανάλογα με το ποσοστό των ασυνεχειών του πετρώματος. Προτείνει ένα πολυφασικό μοντέλο σπηλαιογένεσης όπως προκύπτει από την έρευνά του στο κεντρικό Mendip Hills στην Αγγλία. Είναι δυνατό να εφαρμοστεί για υδροφόρους ορίζοντες σε ασβεστόλιθους, δολομίτες, γύψο και ανυδρίτη όπου η διαπερατότητα και το πορώδες είναι κυρίαρχα πριν από τη δημιουργία ευμεγεθών καρστικών αγωγών. Όταν οι

ασυνέχειες του πετρώματος είναι μεγάλες αλλά αραιές, τότε τα υπόγεια συστήματα υποχρεώνονται να ακολουθήσουν βαθιές διαδρομές κάτω από το επίπεδο των καρστικών πηγών (Bathypheatic Caves), ενώ όταν η συχνότητα των ασυνεχειών αυξάνεται, το εύρος των αγωγών μειώνεται (Phreatic Caves with Multiple Loops).

Οι συνεχείς εξερευνήσεις σπηλαίων σε συνδυασμό με την πρόοδο των γεωλογικών παρατηρήσεων έχουν οδηγήσει στην εξαγωγή σημαντικών συμπερασμάτων σε σχέση με τη σπηλαιογένεση. Σημαντικό ρόλο παίζει η συνεχής ανάμειξη υδατικών διαλυμάτων στην πρόοδο της σπηλαιογένεσης (Bogli, 1960). Επίσης η αύξηση της παροχής νερού μέσα στους καρστικούς αγωγούς οδηγεί στην ταχύτερη διάλυση λόγω της στροβιλώδους ροής, αλλά και στη διάβρωση εξαιτίας της μεταφοράς ιζημάτων. Ο ρυθμός σπηλαιογένεσης σε μία περιοχή έχει σχέση με το βαθμό της καρστικής απογύμνωσης. Επίσης, σημαντικό ρόλο έχουν στη σπηλαιογένεση τα θερμά υδατικά διαλύματα που παρουσιάζουν αυξημένους ρυθμούς διάλυσης.

Το ακριβές χρονικό σημείο γένεσης ενός σπηλαίου δεν είναι δυνατό να οριστεί στο γεωλογικό χρόνο. Το βασικό στοιχείο που ορίζει τη γένεσή τους είναι η πρώιμη και ισχυρή κίνηση υπογείου νερού μέσα από τις παλαιότερες ασυνέχειες, συνήθως τεκτονικές. Αυτό πραγματοποιείται κατά την τεκτονική ανύψωση μίας περιοχής και την έναρξη της καρστικής διάβρωσης. Το υπόγειο νερό διαπερνά τα εκατομμύρια των ασυνεχειών και καθίσταται πολύ γρήγορα υπέρκορο σε όξινο δισανθρακικό ασβέστιο. Η εξέλιξη της διάλυσης οδηγεί στη διεύρυνση των ασυνεχειών και τη δημιουργία καρστικών αγωγών. Ανάλογα με τη χημεία του νερού προχωρά και η διάλυση. Ένας καρστικός αγωγός αυξάνεται κατά ένα μέτρο λόγω διάλυσης σε 1000 χρόνια (Palmer 2003). Η αύξηση των διαστάσεων των υπόγειων αγωγών θα οδηγήσει στην ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα και στην εκκένωση υπόγειων καρστικών τμημάτων από το νερό. Στο πληρωμένο με νερό τμήμα του σπηλαίου συνεχίζεται η καρστική διάλυση ενώ το εναέριο τμήμα χαρακτηρίζεται από την κατά βάθος διάβρωση. Η αυξανόμενη διάλυση του αγωγού σε συνδυασμό με την τεκτονική ανύψωση οδηγεί στην εκκένωσή του από νερό. Σε εναέριες συνθήκες δημιουργούνται και τα περισσότερα σπηλαιοθέματα, οι δευτερογενείς αποθέσεις ορυκτών μέσα σε σπήλαια. Τελικό στάδιο της σπηλαιογένεσης είναι η καταρρευσιγενής μορφολογία και η ολική απογύμνωση της καρστικής περιοχής.

4.3.2 Παράγοντες Σπηλαιογένεσης

Οι παράγοντες που έχουν καθοριστικό ρόλο στη δημιουργία ενός σπηλαίου σε μια καρστική περιοχή είναι οι υδρογεωλογικές συνθήκες που επικρατούν στη συγκεκριμένη περιοχή, η λιθολογία του πετρώματος και η τεκτονική. Τελευταία ερευνάται η συμβολή της συμπύκνωσης στη γένεση των σπηλαίων, δηλαδή του ποσοστού των υδρατμών του αέρα που συμπυκνώνεται μέσα στο σπήλαιο οδηγώντας σε διάλυση και απόθεση του CaCO_3 .

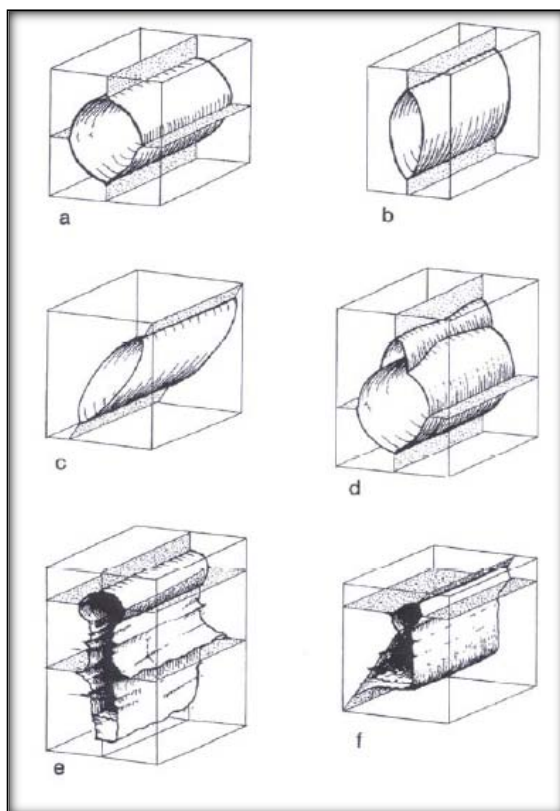
- *Υδρογεωλογικές Συνθήκες.* Το ποσό των κατακρημνισμάτων που κατεισδύουν στο υπόγειο καρστικό σύστημα ελέγχεται από τις υδρογεωλογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή. Οι υπόγειοι υδροφορείς εξελίσσονται ανάλογα με τη διαμόρφωση των γεωλογικών παραμέτρων της περιοχής σε συνδυασμό με την τροφοδοσία του υπόγειου συστήματος με κατεισδύον νερό.

- *Λιθολογία.* Η σύσταση του μητρικού πετρώματος αποτελεί βασικό παράγοντα στη σπηλαιογένεση. Η διάλυση είναι πιο έντονη στους ασβεστόλιθους με υψηλά ποσοστά σε CaCO_3 σε σύγκριση με άλλα ανθρακικά πετρώματα. Ο δολομίτης

($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) είναι λιγότερο διαλυτός από τον ασβεστίτη. Επίσης ο κρυσταλλικός ασβεστίτης σε μάρμαρα διαλύεται πιο δύσκολα απ' ό τι ο ασβεστόλιθος.

- *Τεκτονικές Συνθήκες.* Η κίνηση του νερού ελέγχεται από τη διαμόρφωση των ρηγμάτων, των διακλάσεων και των ρωγμών του ανθρακικού πετρώματος. Όλα αυτά τα στοιχεία ομαδοποιούνται υπό τον όρο τεκτονικές ασυνέχειες. Το μικρότερο άνοιγμα μιας ασυνέχειας που μπορεί να επιτρέψει την έναρξη της δημιουργίας ενός καρστικού αγωγού είναι τα 10μm (Βαξεβανόπουλος, 2007).

Η τεκτονική κατέχει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση των αγωγών ενός σπηλαίου και γενικά στη σπηλαιογένεση (σχήμα 3). Στο στάδιο που ένας αγωγός διαμορφώνεται στη φρεατική ζώνη (πληρωμένος με αργά κινούμενο νερό) τα διαμετρικά του στοιχεία ελέγχονται από τις τεκτονικές ασυνέχειες και τη στρώση του πετρώματος.



Σχήμα 3: Μορφολογία αγωγών ενός σπηλαίου (από Lauritzen & Lundberg 2000).

Στην ύπαρξης μίας κατακόρυφης διάκλασης και οριζόντιας στρώσης, διαμορφώνεται ένας κυκλικής διαμέτρου αγωγός (σχήμα 3a). Το μήκος του οποίου εξαρτάται από το μήκος της ασυνέχειας.

Στο σχήμα 3b,c παρατηρείται τη δημιουργία αγωγού φακοειδούς διατομής, στην περίπτωση μεγάλης διάκλασης ή ρήγματος (η κλίση του εξαρτάται από την κλίση της ασυνέχειας). Οι αγωγοί που διαμορφώνονται στη ζώνη κατείσδυσης έχουν ριζικά διαφορετική διαμόρφωση. Το νερό της κατείσδυσης κινείται με τη βαρύτητα σχεδόν κατακόρυφα. Άρα η διαμόρφωσή τους γίνεται κατά βάθος και πλάγια. Όπως στην κατά βάθος διάβρωση των ποταμών της υπαίθρου έτσι και στη ζώνη κατείσδυσης η διάβρωση ελέγχεται από τοπικά βασικά επίπεδα. Κύριο χαρακτηριστικό είναι η εξαφάνιση των στοιχείων της φρεατικής διαμόρφωσης από το νερό της ζώνης κατείσδυσης λόγω ανύψωσης των πετρωμάτων ή ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα (σχήμα 3e,f).

5. Υδρολογία

5.1 Υδροχημεία

Στο πλαίσιο διερεύνησης των καρστικών διεργασιών σημαντικό ρόλο παίζουν τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του υπόγειου νερού. Οι δείκτες που λειτουργούν ως εργαλεία για την καλύτερη κατανόηση της κίνησης του καρστικού νερού είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC), το σύνολο των διαλυμένων στερεών (TDS), το pH και οι συγκεντρώσεις κατιόντων και ανιόντων (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , HCO_3^{-1}).

Ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC)

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα (Electric Conductivity) αποτελεί το αντίστροφο της ηλεκτρικής αντίστασης και οι μονάδες της είναι $\mu\text{S}/\text{cm}$. Η αύξηση της περιεκτικότητας των διαλυμένων στερεών και της θερμοκρασίας, οδηγεί στην αύξηση της τιμής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Στα υπόγεια νερά οι τιμές κυμαίνονται από $14 \mu\text{S}/\text{cm}$ έως $1100 \mu\text{S}/\text{cm}$.

TDS

Το σύνολο των διαλυμένων στερεών (TDS) συνδέεται άμεσα με την ηλεκτρική αγωγιμότητα και η μέτρηση του εκφράζεται σε mg/lt . Εξαρτάται από τη διαλυτότητα των σχηματισμών μέσα στους οποίους είναι αποταμιευμένο το υπόγειο νερό ή διαρρέοντα από αυτό (Σούλιος, 2006, από Κακλή, 2011). Η παρουσία των αλάτων στο υπόγειο νερό σχετίζεται άμεσα με το είδος των πετρωμάτων, μέσα στα οποία αυτό κινείται, το χρόνο παραμονής του και την ταχύτητα ροής (Βουδούρης, 2009). Σε γρανιτικά πετρώματα οι τιμές του TDS είναι χαμηλές ($200\text{-}300 \text{ mg}/\text{lt}$) ενώ σε ιζηματογενή πετρώματα, εκτός από τις περιπτώσεις των υφάλμυρων υδροφορέων, συναντώνται τιμές TDS έως $1200 \text{ mg}/\text{lt}$.

pH

Ως pH ορίζεται ο αρνητικός δεκαδικός λογάριθμος της συγκέντρωσης H^+ . Το φυσικό νερό έως διάλυμα όταν το:

- $\text{pH} = 7$ είναι ουδέτερο
- $\text{pH} > 7$ είναι αλκαλικό
- $\text{pH} < 7$ είναι όξινο

Σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η σύσταση των πετρωμάτων μέσα στα οποία αναπτύσσονται οι υδροφορείς, μπορεί να είναι όξινα ή αλκαλικά ή ουδέτερα (Σούλιος, 2006, από Κακλή, 2011). Γενικά η τιμή του pH στο νερό μειώνεται όσο μία υδάτινη μάζα ενηλικιώνεται (Βουδούρης, 2009).

Ιόντα Ασβεστίου Ca^{2+} και Μαγνησίου Mg^{2+}

Τα Ιόντα ασβεστίου Ca^{2+} και του Μαγνησίου Mg^{2+} προέρχονται συνήθως από ασβεστόλιθο, δολομίτη ή και γύψο (Palmer, 2007). Σε μία τυπική καρστική περιοχή τα ιόντα ασβεστίου απελευθερώνονται κυρίως από τον ασβεστόλιθο και τα ιόντα του μαγνησίου κυρίως από τον δολομίτη.

Η προέλευση του μαγνησίου συνδέεται επίσης και με τη διάλυση αργιλοπυριτικών ορυκτών (βιοτίτη και χλωρίτη) στα μεταμορφωμένα πετρώματα όπου βρίσκεται προσροφημένος το πλέγμα τους. Οι τιμές των ιόντων του μαγνησίου στο υπόγειο νερό συνήθως είναι κάτω από τα 50 mg/l (Καλλέργης, 2000, από Κακλή, 2011).

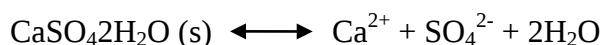
Ιόντα Νατρίου Na^+ και Καλίου K^+

Τα ιόντα Νατρίου Na^{1+} προέρχονται από τους νατριούχους αστρίους (αλβίτη), τα αργιλικά ορυκτά, τους εβαπορίτες και από βιομηχανικά απόβλητα (Καλλέργης, 2000). Οι συγκεντρώσεις των ιόντων νατρίου παίρνουν τιμές μικρότερες από 200 mg/l. Οι συνήθεις τιμές είναι έως 50 mg/l ενώ σε περιπτώσεις ανθρωπογενούς επίδρασης αλλά και υφαλμύρινσης είναι μεγαλύτερες (Σούλιος, 2006). Οι τιμές συγκέντρωσης νατρίου (Dazy et al. 1995, Kim et al., 2003, από Κακλή, 2011) χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της προέλευσης του υπόγειου νερού συγκρίνοντας το με συγκεντρώσεις καλίου ή χλωρίου. Η παραμονή του υπόγειου νερού για μεγάλο χρονικό διάστημα στον υδροφορέα έχει ως αποτέλεσμα υψηλές τιμές συγκέντρωσης νατρίου.

Η κυριότερη πηγή προέλευσης των ιόντων του Καλίου K^+ είναι πετρώματα πλούσια σε καλιούχους αστρίους (ορθόκλαστο και μικροκλινή) σε αστριοειδή και σε αργιλικά ορυκτά (Καλλέργης, 2000). Επίσης, σχετίζονται με ανθρωπογενείς παρεμβάσεις μέσω της χρήσης καλιούχων λιπασμάτων στις καλλιέργειες (Βουδούρης, 2009). Οι τιμές συγκέντρωσης του καλίου είναι κάτω από 10 mg/l και στις θερμές πηγές μέχρι 100mg/l (Καλλέργης, 2000).

Τα θειικά Ιόντα SO_4^{2-}

Τα θειικά ιόντα προέρχονται από τη διάλυση της γύψου ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) και του ανυδρίτη (CaSO_4) σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις (Καλλέργης, 2000, Βουδούρης, 2009):



Επίσης, η οξείδωση θειούχων ενώσεων (πυριτικών) που εμφανίζονται σε αργιλικά πετρώματα, η χρήση λιπασμάτων τύπου $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, τα βιομηχανικά απόβλητα και τα απόβλητα μεταλλείων (Aschenbrenner et al., 1992, από Κακλή, 2011) είναι αιτίες για την εμφάνιση θεικών ανιόντων. Οι τιμές συγκέντρωσης των ιόντων SO_4^{2-} είναι συνήθως κάτω από 300 mg/l εκτός από περιπτώσεις ανθρωπογενούς παρέμβασης (Καλλέργης, 2000 από Κακλή, 2011).

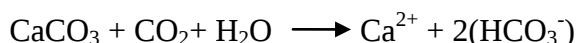
Ιόντα Χλωρίου Cl^-

Τα ιόντα χλωρίου έχουν ως κύρια πηγή προέλευσης τα ιζηματογενή πετρώματα και κυρίως τους εβαπορίτες. Επιπλέον, μπορεί να προέρχονται από μαγματικά πετρώματα, σε θερμές πηγές αλλά και κατά τη διεύθυνση της θάλασσας στους υδροφορείς.

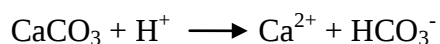
Στις υγρές περιοχές οι συγκεντρώσεις των ιόντων χλωρίου είναι συνήθως κάτω από 10 mg/l στις υγρές περιοχές, ενώ στις ξηρές περιοχές μπορεί να ανέλθει ή και να ξεπεράσει τα 1000 mg/l (Σούλιος, 2006). Παρόλα αυτά έχουν διαπιστωθεί υψηλές συγκεντρώσεις ιόντων χλωρίου ακόμη και σε περιοχές απομακρυσμένες από τη θάλασσα εξαιτίας φαινομένων έντονης εξάτμισης ή αποθέσεων αναλόγων ιζημάτων (Dotsika et al, 2004).

Όξινα ανθρακικά ιόντα, HCO_3^-

Η κύρια προέλευση των όξινων ανθρακικών ιόντων HCO_3^- είναι η καρστική διάλυση σε ανθρακικά πετρώματα. Τα όξινα ανθρακικά ιόντα HCO_3^- προέρχονται είτε από το ατμοσφαιρικό CO_2 , που έρχεται σε επαφή με το ανθρακικό ασβέστιο του ασβεστολίθου ή του δολομίτη. Η αντίδραση παραγωγής των όξινων ανθρακικών ιόντων από το CO_2 είναι η εξής:



Επίσης προέρχονται από τη διάλυση των ανθρακικών πετρωμάτων από το νερό:



Οι τιμές αυτών των ιόντων στα καρστικά νερά μπορεί να ξεπεράσει τα 1000 mg/l (Καλλέργης, 2000). Σημαντικό ρόλο για την αύξηση των όξινων ανθρακικών ιόντων έχει και ο χρόνος παραμονής του νερού μέσα στους σχηματισμούς.

Νιτρικά ιόντα NO_3^-

Η κύρια πηγή προέλευσης τους είναι η ατμόσφαιρα, τα υπολείμματα χλωρίδας, τα νιτρώδη λιπάσματα και τα περιττώματα (Καλλέργης, 2000 από Κακλή, 2011). Τα νιτρικά ιόντα είναι δείκτες για τη ρύπανση των επιφανειακών και υπόγειων νερών από λιπάσματα. Στο πόσιμο νερό το ανώτατο όριο συγκέντρωσης νιτρικών ιόντων είναι τα 50 mg/l ενώ το επιθυμητό όριο είναι τα 24 mg/l. Υψηλές συγκεντρώσεις NO_3^- παρατηρείται σε πετρώματα με μεγάλη περατότητα.

5.2 Ιχνηθετήσεις (tracing)

Οι υδρολογικές συνθήκες μιας περιοχής εξαρτώνται άμεσα από την παρουσία των ανθρακικών σχηματισμών και την έντονη τεκτονική που επικρατεί. Στους καρστικούς υδροφορείς τα κατεισδύοντα επιφανειακά νερά ακολουθούν την κλίση των πετρωμάτων και τις διευθύνσεις των ζωνών διάρρηξης. Δημιουργούνται έτσι χαρακτηριστικές καρστικές πηγές με αξιόλογη παροχή, η οποία μειώνεται δραστικά κατά την ξηρή περίοδο (Σταμάτης & Ζαγγανά, 2004).

Για τη διερεύνηση της κίνησης του υπογείου νερού χρησιμοποιείται η μέθοδος της ιχνηθέτησης. Η ιχνηθέτηση είναι δυνατόν να γίνει με φυσικούς ιχνηθέτες, όπως ισότοπα και μολυντές ή με τεχνητούς, όπως σπόρια (*Lycopodium*), χημικές ενώσεις αλάτων (NaCl, KCl κ.α.), χημικά στοιχεία και ουσίες (Ινδίο, Μαγγάνιο, Βρώμιο, Ιώδιο), ραδιενεργοί ιχνηθέτες (^3H , ^{51}Cr , ^{82}Br , ^{131}I) και φθορίζουσες ουσίες (Uranine, Rhodamine κ.α.).

Η ιχνηθέτηση διακρίνεται σε ποιοτική και ποσοτική. Η ποιοτική ιχνηθέτηση προσπαθεί να διαπιστώσει τις υδρολογικές σχέσεις μεταξύ εισόδων (καταβόθρες, σημεία κατείσδυσης) και εξόδων (καρστικές πηγές) στο υπόγειο καρστικό σύστημα. Η ποσοτική ιχνηθέτηση αναλύει τις ποσοστιαίες σχέσεις μεταξύ του νερού που κατεισδύει σε διάφορα σημεία και του νερού που εξέρχεται από το καρστικό σύστημα.

6. Μεθοδολογία

6.1 Έρευνα Υπαίθρου

Η έρευνα υπαίθρου περιελάμβανε τη γεωλογική χαρτογράφηση της περιοχής γύρω από τη Νεροσπηλιά, την καταγραφή των επιφανειακών καρστικών μορφών, τη χαρτογράφηση των σπηλαίων της περιοχής μελέτης και καταγραφή των βασικών υδρογεωλογικών στοιχείων (παροχή «Νεροσπηλιάς» και επιμέρους χειμάρρων, μέτρηση pH, αγωγιμότητας, ιοντικών στοιχείων και ιχνηθέτηση για τον έλεγχο της απορροής των υδάτων).

6.1.1 Χαρτογράφηση Περιοχής

Στη περιοχή μελέτης πραγματοποιήθηκε γεωλογική χαρτογράφηση κλίμακας 1:20000 προκειμένου να ενταχθούν σε αυτή τα σημεία ιδιαίτερου ενδιαφέροντος. Κατά τη χαρτογράφηση χρησιμοποιήθηκε γεωλογική πυξίδα και G.P.S. (μοντέλου Garmin Dakota 20), αναλυτικά χαρτογραφήθηκε η περιοχή της εισόδου του σπηλαίου, η περιοχή της δημιουργίας του χειμάρρου Τσιγγενόρρεμα και η καρστική πόλγη του Μέγα-Λάκκου.

Τα πετρώματα που χαρτογραφήθηκαν και αποτελούν τις βασικές λιθοστρωματογραφικές ενότητες της Υποπελαγονικής ζώνης είναι: η σχιστοκερατολιθική διάπλαση, ο φλύσχης, το κροκαλοπαγές βάσης, ο ασβεστόλιθος του Άνω Κρητιδικού, οι νεότερες αποθέσεις μεταλλικών ιζημάτων και ο τραβερτίνης.

Επίσης, μελετήθηκε η τεκτονική της περιοχής της εισόδου της Νεροσπηλιάς και τα ρήγματα δημιουργίας του καρστικού βυθίσματος Μέγα-Λάκκου.

6.1.2 Χαρτογράφηση Επιφανειακών Καρστικών μορφών

Στη παρούσα διατριβή πραγματοποιήθηκε καταγραφή των επιφανειακών καρστικών μορφών με τη βοήθεια του G.P.S (μοντέλου Garmin Dakota 20). Η καταγραφή έγινε στη περιοχή της εισόδου της Νεροσπηλιάς με κατεύθυνση Βόρεια προς το Φαράγγι της Νεροσπηλιάς. Εκτός αυτών, καταγράφηκαν και οι επιφανειακές καρστικές μορφές και στη περιοχή Μέγα-Λάκκου.

6.1.3 Χαρτογράφηση Υπόγειων Καρστικών μορφών

Χαρακτηριστικό της περιοχής μελέτης είναι οι υπόγειοι καρστικοί σχηματισμοί. Στη παρούσα μελέτη, χαρτογραφήθηκαν τα σπήλαια «Νεροσπηλιά» και το σπήλαιο «Δρόμου».

Η χαρτογράφηση των σπηλαίων έγινε με τον κλασικό τρόπο, κατά τον οποίο τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν είναι η μετροταινία, μία γεωλογική πυξίδα και ένα αποστασιόμετρο (BOSCH DLE 50 Professional). Αρχικά, χρησιμοποιείται η μετροταινία, μέσω της οποίας μετράται το μήκος του μεγίστου άξονα του θαλάμου που θέλουμε να χαρτογραφήσουμε. Στη συνέχεια υπολογίζεται το αξιμούθιο και η

κλίση που έχει η συγκεκριμένη ευθεία με τη πυξίδα. Ενώ, με το αποστασιόμετρο μετράται πάνω στη μετροταινία ανά συγκεκριμένο διάστημα το αριστερό πλάτος, το ύψος (ολικό – από το έδαφος μέχρι την οροφή του σπηλαιίου) και το δεξιό πλάτος του θαλάμου. Οι μετρήσεις με το αποστασιόμετρο συνεχίζονται πάνω στη μετροταινία με σταθερή όδευση (π.χ. ανά 2m).

Ως σταθμοί ορίζονται τα άκρα του άξονα που μετρά η μετροταινία, και συνήθως η αρχή των μετρήσεων τοποθετείται στην είσοδο του σπηλαιίου, όπου είναι ο πρώτος σταθμός, ο οποίος συμβολίζεται με τον αριθμό 1. Το μήκος ενός σταθμού αλλάζει όταν παρατηρηθεί μεταβολή στη διεύθυνση του άξονα των μετρήσεων, έτσι στο συγκεκριμένο παράδειγμα ο επόμενος σταθμός θα συμβολιστεί με τον αριθμό 2, ο επόμενος 3 κ.ο.κ.

Οι μετρήσεις πεδίου ληφθήκαν σε 6 συναπτές αποστολές που πραγματοποιήθηκαν στα σπήλαια (εικόνα 9). Απαιτήθηκε χρόνος 1,5 μήνας και 7 άτομα για να παραχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Παράλληλα με την αποτύπωση του σπηλαιίου πραγματοποιήθηκε χαρτογράφηση των γεωλογικών ενοτήτων και των τεκτονικών ρηγμάτων.



Εικόνα 9: Αποψη από τις εργασίες πεδίου κατά τη χαρτογράφησης της Νεροσπηλιάς.

6.1.4 Υδροχημεία

Για την κατανόηση της εξέλιξης ενός καρστικού συστήματος σημαντικό ρόλο διαδραματίζει ο χημισμός του καρστικού νερού. Τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά του νερού που κινείται υπόγεια στο καρστ αποτελούν δείκτες της καρστικής διάβρωσης.

Κατά τη διάρκεια ενός χρόνου πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις παροχής στη Νεροσπηλιά και σε χειμάρρους κατάντι της.

Επίσης, στις 21-04-2013 πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία στην καρστική πηγή της «Νεροσπηλιάς» και στην πηγή ανατολικά του σπηλαίου και στην πηγή «Βρύση» δυτικά σε διαφορετικές χρονικές στιγμές σε διάστημα 12 ωρών. Παράλληλα, μετρήθηκαν με φορητά όργανα (Crison, μοντέλο MM40) οι φυσικοχημικές παράμετροι, όπως η θερμοκρασία °C, το pH και η αγωγιμότητα.

Συγκεντρωτικά, κατά τη διερεύνηση των υδρογεωλογικών συνθηκών στη περιοχή της Νεροσπηλιάς πραγματοποιήθηκαν τα εξής:

- Μέτρηση της παροχής εσωτερικά και εξωτερικά της Νεροσπηλιάς.
- Μέτρηση της παροχής του χειμάρρου κατάντι της Νεροσπηλιάς.
- Μετρήσεις pH του καρστικού νερού.
- Μετρήσεις αγωγιμότητας EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$).
- Μετρήσεις συγκέντρωσης Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- .
- Μέτρηση ποσού κατακρημνισμάτων.

Μετρήσεις pH και αγωγιμότητας

Πραγματοποιήθηκε μέτρηση αγωγιμότητας και pH στην είσοδο της Νεροσπηλιάς, καθώς και σε κοντινή καρστική πηγή ανατολικά της Νεροσπηλιάς. Σε πηγή δυτικά του σπηλαίου πραγματοποιήθηκε μόνο μέτρηση της αγωγιμότητας.

Μετρήσεις παροχής

Η μέτρηση της παροχής πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο του μυλίσκου (Meter Model OSS PC1). Η διατομή σε συγκεκριμένα σημεία του ρου της Νεροσπηλιάς και των κατάντι χειμάρρων εμβαδομετρήθηκαν και με τη βοήθεια του μυλίσκου υπολογίστηκαν οι επιμέρους ταχύτητες. Στη συνέχεια η παροχή υπολογίζεται από τον τύπο $q=A \times V$.

Όπου A = το εμβαδόν της διατομής και V = η ταχύτητα ροής κίνησης του ρευστού.

Μέτρηση ποσού κατακρημνισμάτων

Συλλέχθηκαν βροχομετρικά δεδομένα για τον υπολογισμό του ποσού των κατακρημνισμάτων. Η συλλογή πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια ανοιχτού βροχόμετρου. Η παρακολούθηση διήρκεσε περίπου για ένα χρόνο.

6.1.5 Ιχνηθέτηση

Στη παρούσα μελέτη του καρστικού συστήματος της Ανατολικής πλευράς της Όθρυς, συγκεκριμένα στη περιοχή της Νεροσπηλιάς – Μέγα Λάκκου, πραγματοποιήθηκε ιχνηθέτηση με ευδιάλυτο άλας (NaCl).

Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε ιχνηθέτηση στη καταβόθρα K, η οποία βρίσκεται στα περιθώρια της πόλγης του Μέγα-Λάκκου, κατά το μήνα Απρίλιο 2012. Χρησιμοποιήθηκαν 200 Kg υψηλής καθαρότητας NaCl και ~1400 λίτρα νερού συνολικά.

Το πρώτο διάλυμα (5 Kg NaCl διαλυμένο σε περίπου 40 λίτρα νερό) διοχετεύθηκε στη καταβόθρα K στις 21-04-2012 στις 15:30. Μέχρι τις 17:30 διοχετεύθηκαν 112 Kg NaCl διαλυμένα σε ~700 λίτρα νερό. Η διαδικασία αυτή ολοκληρώθηκε στις 19:30.

Την ίδια ημέρα ξεκίνησαν οι μετρήσεις των μεταβολών της ηλεκτρικής αγωγιμότητας με δύο φορητά αγωγιμόμετρα στην είσοδο της Νεροσπηλιάς και στη πηγή «Βρύση» στις 15:25. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνταν περίπου ανά 10λεπτό και διήρκησαν μέχρι τις 24:00 της ίδιας ημέρας.

6.2 Εργασίες Γραφείου

6.2.1 Ανάλυση Χαρτογραφικών Δεδομένων (G.I.S.)

Η ψηφιοποίηση του γεωλογικού χάρτη πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον Γ.Σ.Π. (Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών) με τη χρήση του προγράμματος ArcGIS 9.3. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν τα φύλλα του γεωλογικού χάρτη κλίμακας 1:50000 Ανάβρα, Αλμυρός, Πελασγία και Στυλίδα (Ι.Γ.Μ.Ε.). Η ψηφιοποίηση επικεντρώθηκε στις ισοϋψείς καμπύλες και στα γεωλογικά στοιχεία (γεωλ. σχηματισμοί, ρήγματα). Η παραγωγή των ψηφιακών μοντέλων αναγλύφου (DEM) έγινε στο πρόγραμμα Global Mapper 10.0, όπως και η εξαγωγή της γεωλογικής τομής της περιοχής μελέτης.

6.2.2 Αποτύπωση του σπηλαιίου «Νεροσπηλιά»

Μετά τις εργασίες πεδίου, οι μετρήσεις από το σπήλαιο καταχωρούνται σε προγράμματα αποτύπωσης (εικόνα 10). Στη παρούσα διατριβή, τα δεδομένα επεξεργάστηκαν με το πρόγραμμα Visual Topo. Το πρόγραμμα διατίθεται δωρεάν στη σελίδα <http://vtopo.free.fr/> και έχει ελληνική έκδοση. Πρόκειται για ένα πρότυπο εισαγωγής δεδομένων σε μορφή κελιών και μετατροπή τους σε απεικονίσεις. Οι απεικονίσεις που διαθέτει είναι κάτοψη του σπηλαιίου, τομή, εκτεταμένη τομή, κινούμενο σχέδιο και τρισδιάστατη απεικόνιση.

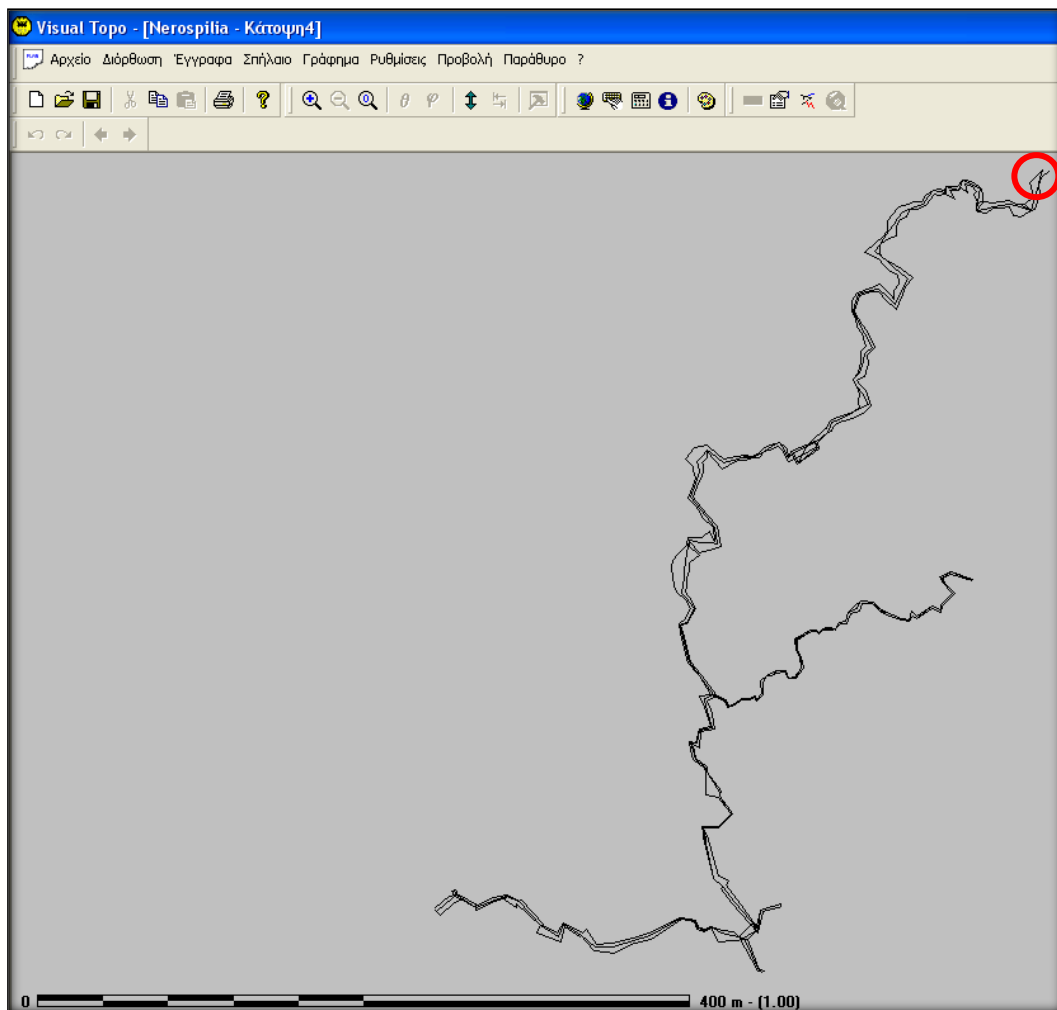
Visual Topo - [Nero spilia]

File Edit Documents Save Settings View Window 2

	From	To	From Topof.	To Topof.	Distance	Bearing	Slope	Left	Right	Top	Bottom
82	29a	29b			5.00	240.00	4.00	0.00	1.70	5.00	
83	29b	29c			5.00	240.00	4.00	1.60	0.40	3.20	
84	29c	30			3.90	240.00	4.00	0.00	1.30	5.30	
85	30	30a			5.00	284.00	0.00	0.80	0.90	4.50	
86	30	31			4.60	284.00	0.00	2.20	0.70	4.50	
87	31	31a			5.00	255.00	0.00	1.50	1.60	4.00	
88	31a	32			8.80	255.00	0.00	4.30	1.80	2.50	
89	32	32a			5.00	307.00	5.00	2.00	1.90	3.00	
90	32a	33			7.50	307.00	5.00	0.90	2.70	4.90	
91	33	33a			5.00	220.00	40.00	3.10	7.30	5.70	
92	33a	34			7.40	220.00	40.00	3.20	7.10	4.10	
93	34	34a			3.00	163.00	-40.00	3.60	3.50	3.20	
94	34a	35			4.72	163.00	-40.00	2.30	4.00	3.30	
95	35	35a			5.00	200.00	-5.00	2.10	0.90	5.60	
96	35a	35b			5.00	200.00	-5.00	1.60	0.60	4.20	
97	35b	36			7.40	200.00	-5.00	1.50	1.60	10.00	
98	36	36a			5.00	140.00	0.00	1.10	1.10	6.40	
99	36a	36b			5.00	140.00	0.00	1.40	1.00	7.00	

Εικόνα 10: Μεταφορά των μετρήσεων και η απεικόνιση τους στο πρόγραμμα χαρτογράφησης σπηλαίων Visual Topo. Στις πρώτες δύο στήλες καταγράφονται οι σταθμοί της χαρτογράφησης, ενώ στις επτά δεξιότερες τα στοιχεία κάθε μέτρησης (μήκος, αζιμούθιο, κλίση).

Αφού έχει ολοκληρωθεί η μεταφορά όλων των δεδομένων, προκύπτει η χαρτογράφηση της Νεροσπηλιάς σε κάτοψη (εικόνα 11). Στη συνέχεια, με τη βοήθεια του προγράμματος Coreldraw X5, πραγματοποιήθηκε επεξεργασία της χαρτογράφησης (που προέκυψε από το Visual Topo), για όσο το δυνατό καλύτερο και λεπτομερέστατο αποτέλεσμα (βλ. κεφάλαιο 8.3.1).



Εικόνα 11: Άποψη της κάτοψης του σπηλαίου Νεροσπηλιά, όπως προκύπτει από το πρόγραμμα Visual Topo (πάνω δεξιά βρίσκεται η είσοδος του σπηλαίου).

6.2.3 Εργαστηριακές Αναλύσεις

Οι υδροχημικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας του Α.Π.Θ, όπου προσδιορίστηκαν οι υδροχημικοί παράμετροι. Συγκεκριμένα οι μετρήσεις των ιόντων ασβεστίου Ca^{2+} , μαγνησίου Mg^{2+} και των όξινων ανθρακικών ιόντων HCO_3^{1-} πραγματοποιήθηκαν μέσω της τιτλοδότησης, οι μετρήσεις των ιόντων χλωρίου Cl^- , των νιτρικών ιόντων NO_3^{1-} και των θειικών ιόντων SO_4^{2-} με τη χρήση φασματοφωτόμετρου HACH DR2000 και τέλος οι μετρήσεις συγκέντρωσης των ιόντων καλίου K^+ και νατρίου Na^+ μέσω φλογοφωτόμετρου.

7. Αποτελέσματα

7.1 Γεωλογία – Γεωμορφολογία περιοχής μελέτης

Η περιοχή μελέτης καλύπτει περίπου 24km² και χαρακτηρίζεται από έντονο ορεινό ανάγλυφο με υψόμετρα από 400m έως 1726m. Βρίσκεται νοτίως του χωριού Κοκκωτοί (και Κωφοί) και δυτικά του χωριού Αγ. Ιωάννης. Οι λιθοστρωματογραφικές ενότητες της Υποπελαγονικής ζώνης από την νεότερη στη παλαιότερη είναι οι εξής: ο φλύσχος (Ανώτερο Κρητιδικό), οι πλακώδεις – μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι του Άνω Κρητιδικού, το κροκαλοπαγές βάσης Άνω Κρητιδικής επίκλυσης, η σχιστοκερατολιθική διάπλαση του Κρητιδικού και οι δολομίτες του Τριαδικού. Στη μάζα της σχιστοκερατολιθικής διάπλασης συναντώνται τεμάχια οφιολίθων, όπως σερπεντινίτες, χαρτσβουργίτες, δουνίτες και λερζόλιθοι. Μικρής έκτασης είναι οι τραβερτινικές αποθέσεις.

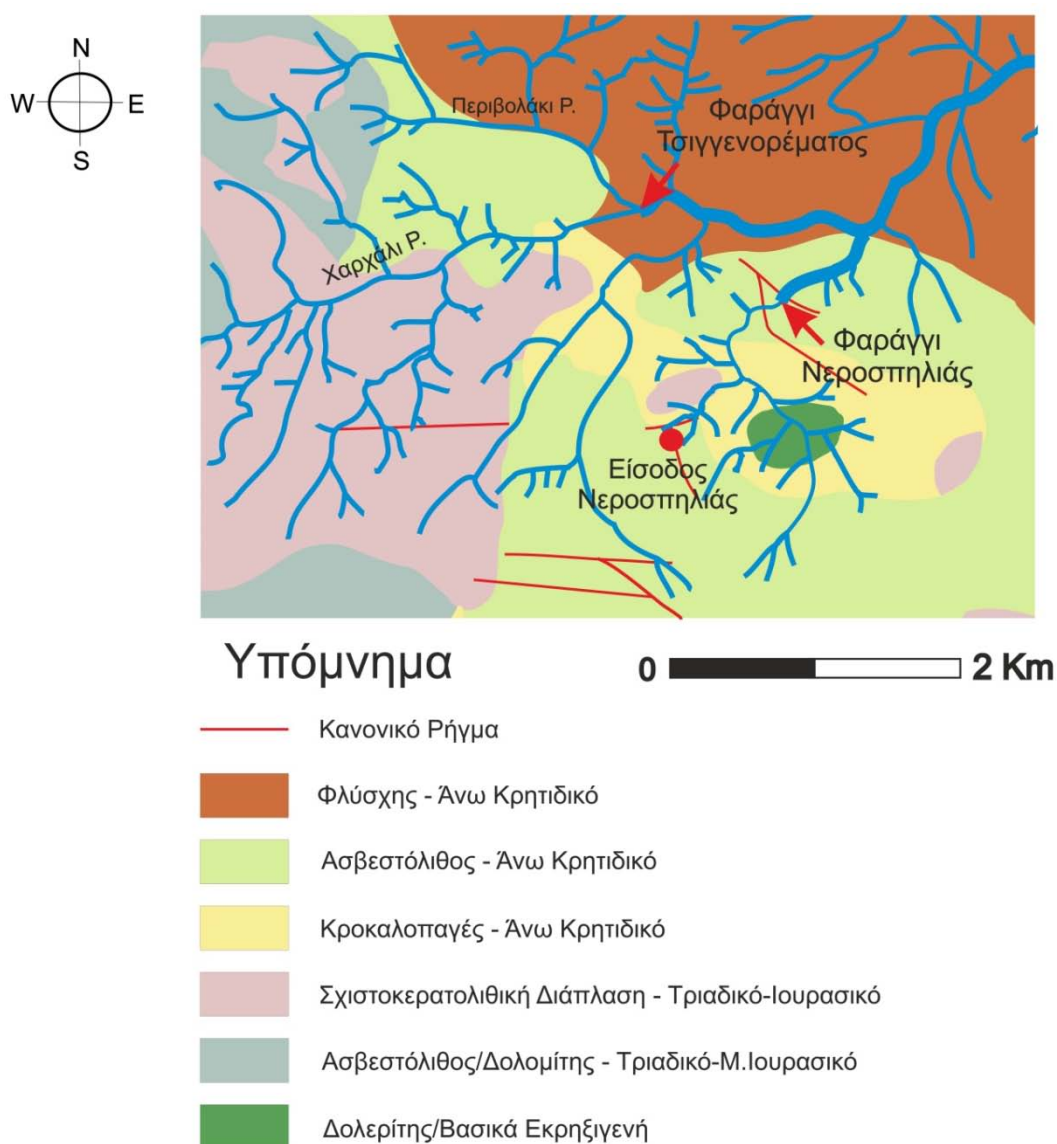


Εικόνα 12: Άποψη του τραβερίτη πάνω στα κορήματα της Νεροσπηλιάς. Τα κορήματα υπέρκεινται της σχιστοκερατολιθικής διάπλασης.



Εικόνα 13: Παρατήρηση του φλύσχη στην περιοχή μελέτης. Διακρίνεται ασβεστολιθική στρώση στην ακολουθία του φλύσχη (βέλος).

Η περιοχή χαρακτηρίζεται από έντονη τεκτονική ανύψωση (Γαλανάκης, 1997) δημιουργώντας έντονες μορφές κατά βάθος διάβρωσης, όπως για παράδειγμα το φαράγγι της Νεροσπηλιάς και του Τσιγγενορέματος (εικόνα 14).



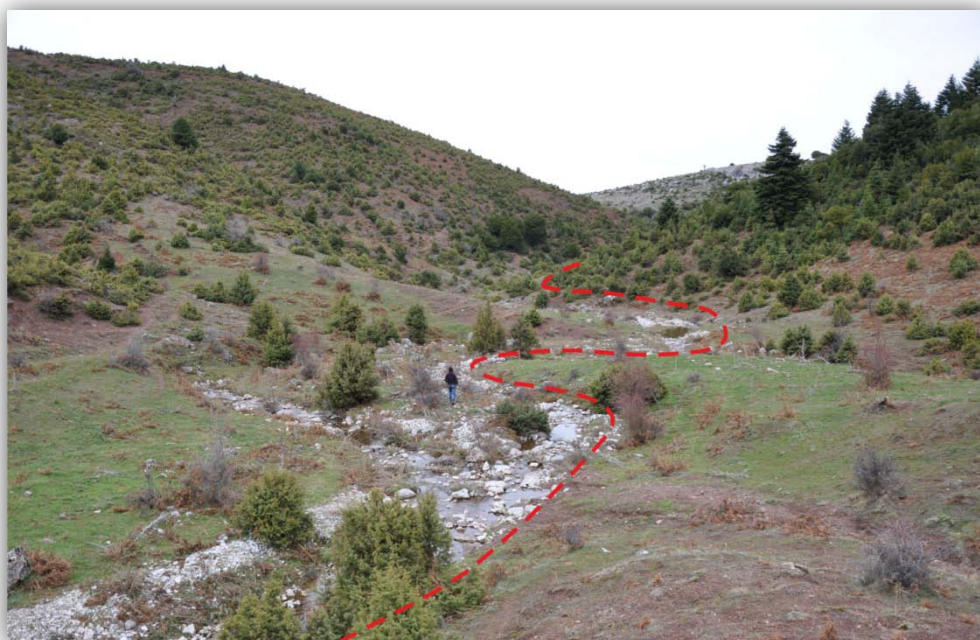
Εικόνα 14: Η περιοχή τοποθέτησης των δύο φαραγγιών (Νεροσπηλιάς & Τσιγγενορέματος) της περιοχής μελέτης.

Συγκεκριμένα, το φαράγγι της Νεροσπηλιάς (εικόνα 14) δημιουργείται μέσα στους ασβεστόλιθους του Άνω Κρητιδικού ακολουθώντας παλιότερες τεκτονικές γραμμές διεύθυνσης ΒΑ-ΝΔ.

Κατά μήκος της ροής του νεότερα κανονικά ρήγματα δημιουργούν απότομους καταρράκτες, ύψους μέχρι 25m. Στα ανάντι του φαραγγιού της Νεροσπηλιάς, ο συγκεκριμένος χείμαρρος διέρχεται μαιανδρίζοντας από επιπεδωμένη περιοχή (εικόνα 16) αποτελούμενη από κροκαλοπαγή και οφιολίθους.



Εικόνα 15: Αποψη του χειμάρρου της Νεροσπηλιάς κατευθυνόμενος προς το φαράγγι της Νεροσπηλιάς.



Εικόνα 16: Παρατήρηση της επιπεδωμένης επιφάνειας ανάμεσα στη Νεροσπηλιά και το Φαράγγι της Νεροσπηλιάς. Διακρίνεται ο μαιανδρισμός του χειμάρρου.



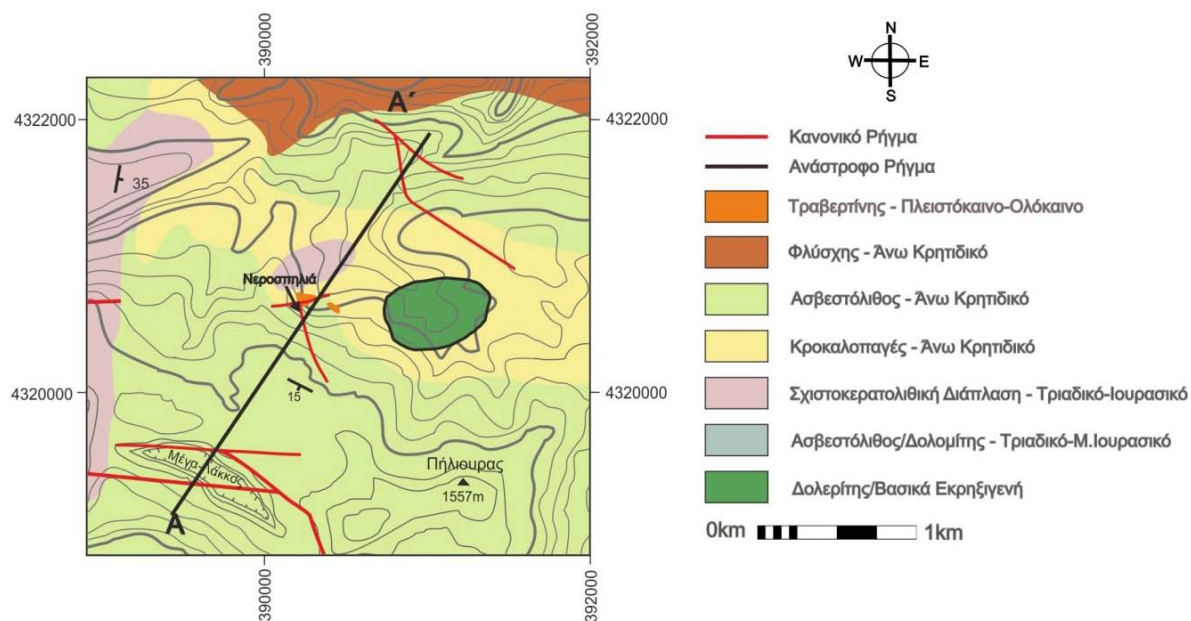
Εικόνα 17: Αρχή του φαραγγιού της Νεροσπηλιάς.



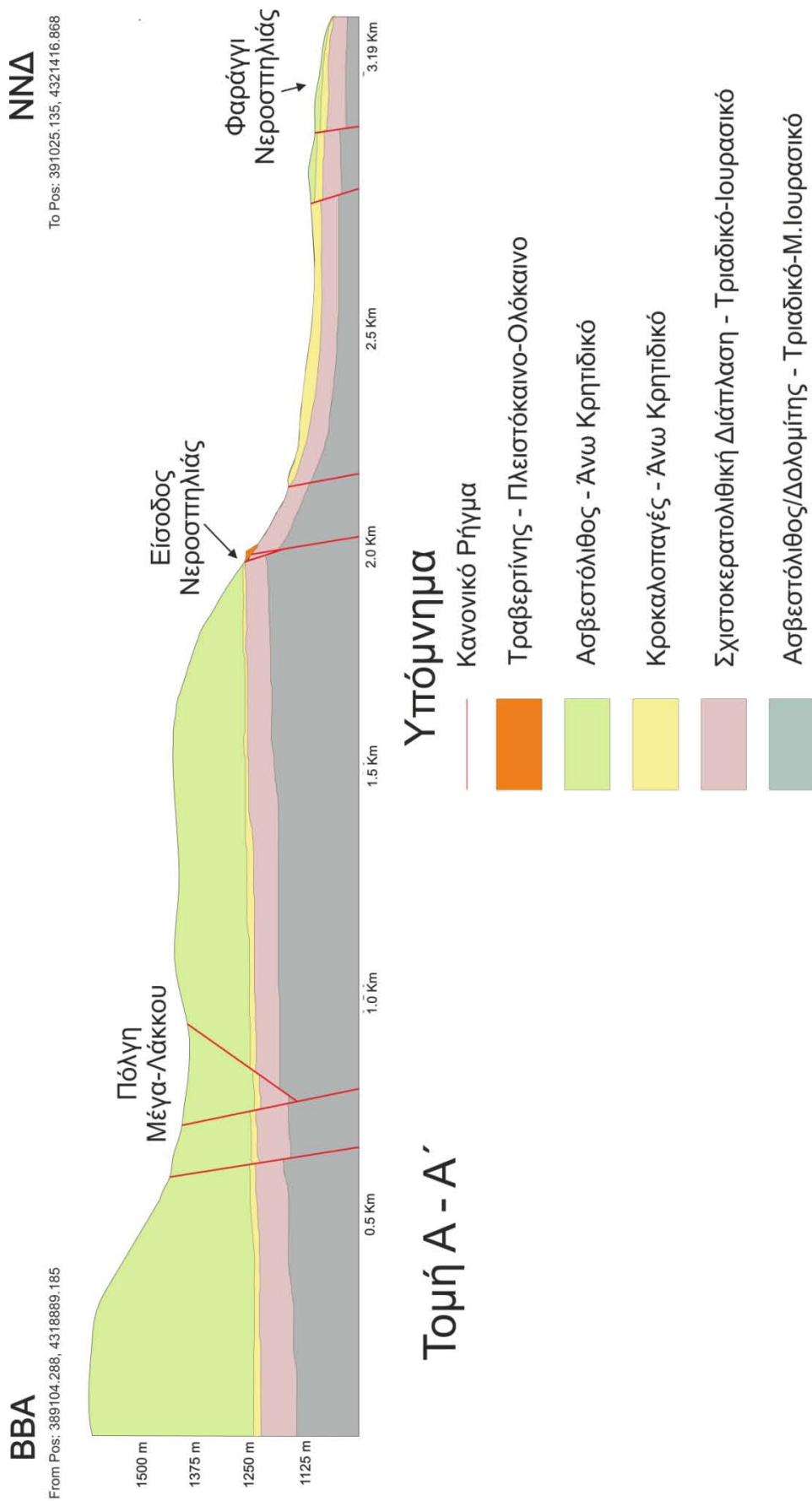
Εικόνα 18: Άποψη μεταπτωτικού ρήγματος στο φαράγγι Νεροσπηλιάς.

Σε πολλά σημεία στα κροκαλοπαγή του Άνω Κρητιδικού παρατηρείται η σχιστοκερατολιθική διάπλαση ως τεκτονικό παράθυρο, μεγάλα κανονικά ρήγματα ταπεινώνουν περιοχές, όπως τη περιοχή του Μέγα-Λάκκου ή ανυψώνοντας δημιουργούν τεκτονικά κέρατα, όπως η περιοχή Δραμπάλα (υψ. 1111m). Ο Γαλανάκης (1997) θεωρεί ότι η ηλικία των επιπεδωμένων επιφανειών με υψόμετρο 1150m έως 1300m είναι του Μέσο-Άνω Μειοκαίνου, ενώ οι επιφάνειες 870m έως 980m είναι του Κατ. Πλειοκαίνου.

Στη συνέχεια παρατίθεται η γεωλογική τομή BBA-NNΔ της περιοχής μελέτης (από τη πόλη του Μέγα-Λάκκου μέχρι την αρχή του φαραγγιού της Νεροσπηλιάς).



Εικόνα 19: Άποψη της γεωλογικής τομής Α – Α'.



Εικόνα 20: Γεωλογική Τομή BBA-NNA της περιοχής μελέτης.

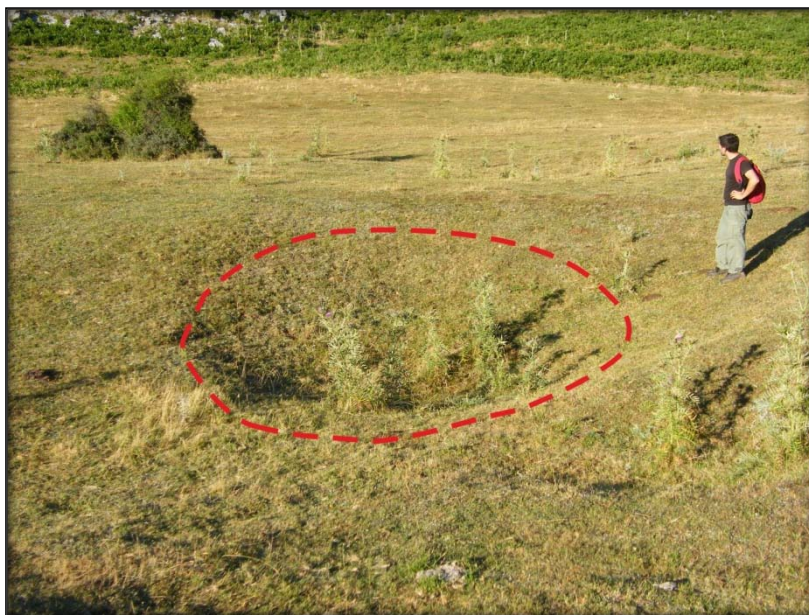
7.2 Επιφανειακές καρστικές μορφές στην περιοχή Μέγα-Λάκκου, Νεροσπηλιάς

Στη περιοχή μελέτης, η ύπαρξη ασβεστολίθου και οι κατάλληλες τεκτονικές και υδρολογικές συνθήκες βοηθούν στη δημιουργία μεγάλων και μικρών καρστικών μορφών. Χαρακτηριστική είναι η πόλγη «Μέγα Λάκκος», η οποία βρίσκεται ΝΑ του όρους Όθρυς. Στην συνέχεια αναλύονται οι επιμέρους καρστικές μορφές που συναντώνται στην περιοχή μελέτης.

7.2.1 Μεγάλες Επιφανειακές καρστικές μορφές στην περιοχή μελέτης

Δολίνη

Οι περισσότερες δολίνες στην περιοχή μελέτης τοποθετούνται στο κατώτερο υψομετρικά σημείο της πόλγης του Μέγα-Λάκκου και λειτουργούν ως απαγωγοί του επιφανειακού νερού στο υπόγειο καρστικό σύστημα (καταβόθρες). Έχουν διάμετρο από 1m από έως 35m. Μικρότερες δολίνες παρατηρούνται σε μεγαλύτερα υψόμετρα και σε λιγότερα ομαλά ανάγλυφα. Το μεγαλύτερο ποσοστό των δολινών είναι πληρωμένο με αργιλικό υλικό διηθώντας το επιφανειακό νερό. Στα μεγαλύτερα υψόμετρα στερούνται επιφανειακού καλύμματος.



Εικόνα 21: Παρατήρηση δολίνης στη περιοχή της πόλγης Μέγα-Λάκκου.

Πόλη «Μέγας-Λάκκος»

Η πόλη «Μέγας-Λάκκος» είναι μία μεγάλη επιμηκυσμένη κλειστή καρστική εκβάθυνση. Η επιφάνεια του πυθμένα της είναι επίπεδη, καλυμμένη με αργιλικό υλικό και διάσπαρτα τεμάχια ασβεστολίθου. Το μήκος της είναι 1350 m, το μέσο πλάτος της 230m και το βάθος περίπου 60 m (εικόνα 22).



Εικόνα 22: Αποψη της πόλης Μέγα Λάκκου, Νεροσπηλιάς.

Η ύπαρξη της πόλης του Μέγα Λάκκου οφείλεται όχι μόνο σε καρστικά φαινόμενα, αλλά και σε τεκτονικά αίτια. Χαρακτηριστικό αυτής της πόλης είναι η ύπαρξη 7 καταβοθρών στην περιφέρεια της, εκ των οποίων η μία βρίσκεται σε άμεση επαφή με την επιφανειακή απορροή ενώ στις υπόλοιπες πραγματοποιείται διήθηση του νερού, εξαιτίας της πλήρωσης τους με αργιλικό υλικό. Η διάμετρος τους ποικίλει από 1m έως και 35m.



Εικόνα 23: Αποψη καταβόθρας στα περιθώρια της πόλης «Μέγα Λάκκου» (με βέλος τοποθετείται η ακριβής θέση της).

7.2.2 Μικρές επιφανειακές καρστικές μορφές στη περιοχή μελέτης

Κοιλώματα διάλυσης (Kamenitzas)

Στην περιοχή Μέγα-Λάκκου αναπτύχθηκαν τα κοιλώματα διάλυσης (Kamenitzas) σε οριζόντιες επιφάνειες, πάνω στις οποίες δεν μπορούσε να γίνει συνεχόμενα η ροή του νερού. Ο πυθμένας τους είναι επίπεδος και οριζόντιος, αλλά μερικές φορές μπορεί να έχει απότομες προεξοχές. Η διάμετρος τους, κυμαίνεται μεταξύ 4-5 cm, ενώ το βάθος τους είναι περίπου 5 cm (εικόνες 24 & 25).



Εικόνα 24: Παρατήρηση κοιλωμάτων διάλυσης (Kamenitzas).



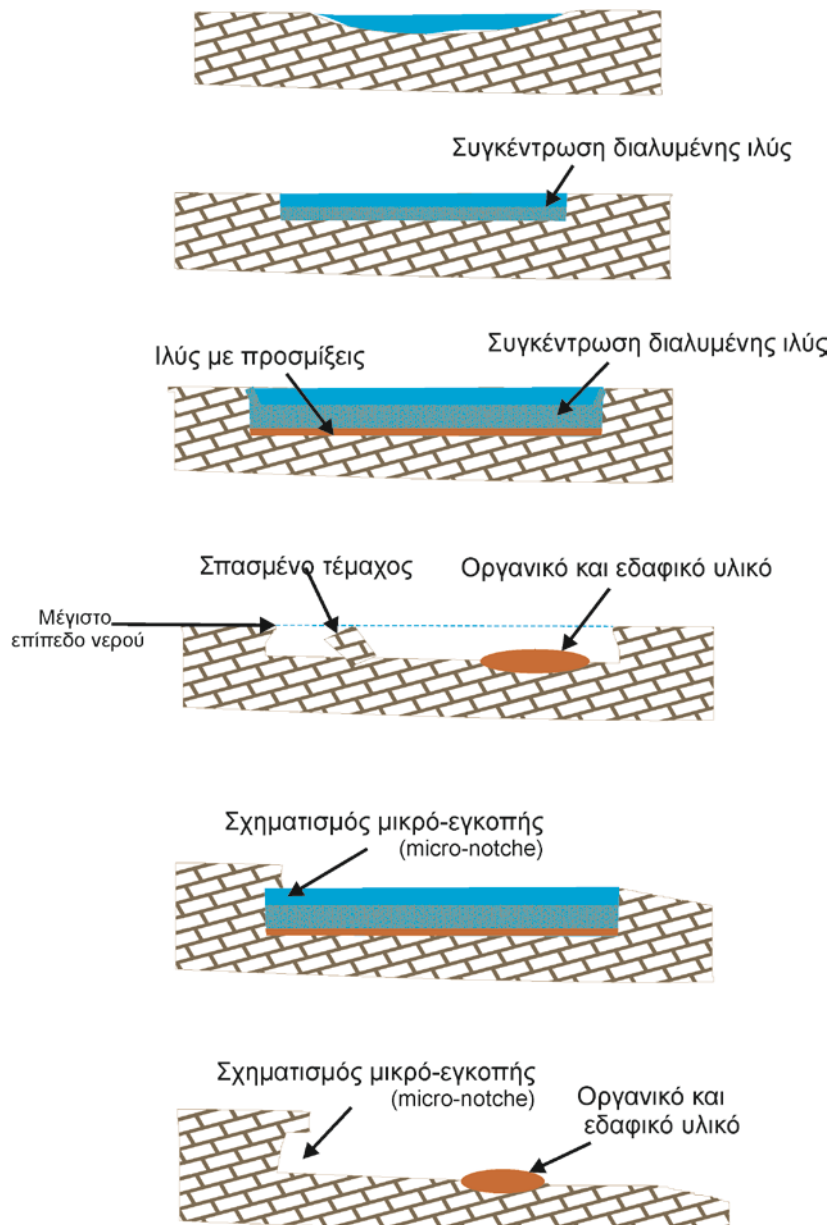
Εικόνα 25: Άποψη κοιλωμάτων διάλυσης στην περιοχή της πόλγης Μέγα-Λάκκου.

Επιφανειακές χύτρες (effluent runnels)

Εκτός των κοιλωμάτων διάλυσης, στην περιοχή μελέτης έχουν δημιουργηθεί οι λεγόμενες ‘επιφανειακές χύτρες’ (εικόνα 26). Συγκεκριμένα, δημιουργήθηκε σε δύο φάσεις, κατά την πρώτη λόγω της ύπαρξης βρόχινου νερού μέσα στο κοίλωμα, αρχίζει η διάβρωση των πλευρών του κοιλώματος και ακολουθείται η απογύμνωση του πετρώματος. Στη δεύτερη φάση το κοίλωμα διευρύνεται πλευρικά, στη βάση του κοιλώματος υπάρχουν πεσμένα τεμάχια, λόγω της διάβρωσης και οργανικό και εδαφικό υλικό, με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν μικρές εγκοπές, συνοδευόμενες από την εκροή του νερού. Στη συνέχεια, λόγω της εκροής του νερού, μειώνεται η πλευρά του κοιλώματος και έτσι διοχετεύεται έξω από το κοίλωμα, με αποτέλεσμα το σχηματισμό των επιφανειακών χύτρων (effluent runnels) (σχήμα 3).



Εικόνα 26: Άποψη τριών επιφανειακών χύτρων (effluent runnels) στην πόλγη Μέγα Λάκκος.



Σχήμα 3: Διαδικασία δημιουργίας των επιφανειακών χυτρών ‘effluent runnels’.
(Τροποποίηση από Cucchi, 2009)

Γλυφές τοιχωμάτων (Wandkarren)

Στα περιθώρια της πόλγης Μέγα Λάκκου, εμφανίζονται οι σχηματισμοί «Γλυφές Τοιχωμάτων» (Wandkarren ή wall solutional runnels), οι οποίες δημιουργούνται σε επιφάνειες με κλίση εξαιτίας τη ροή του νερού (εικόνα 27). Είναι παράλληλες η μία με την άλλη και έχουν ημικυκλική τομή. Αναπτύσσονται σε κάθετα τοιχώματα (για παράδειγμα τα τοιχώματα ενός πηγαδιού), επίσης, σε περιοχές που έχουν αναβαθμίδες, όπως τα περιθώρια της πόλγης ή της δολίνης. Το μέγεθος τους, στη περιοχή μελέτης κυμαίνεται περίπου από 35cm ύψος και 70cm η ανάπτυξη τους σε πλάτος και έχουν σχήμα ημικυκλικό. Η δημιουργία τους οφείλεται στη κίνηση του νερού της βροχής στα κατακόρυφα σχεδόν τοιχώματα του πετρώματος.



Εικόνα 27: Παρατήρηση των γλυφών τοιχωμάτων (wandkarren) στα περιθώρια της πόλγης Μέγα Λάκκου, Νεροσπηλιάς.

Μαιανδροειδείς Γλυφές (Meanderkarren)

Στη περιοχή της πόλγης του Μέγα-Λάκκου αλλά και στην περιοχή του φαραγγιού ‘Τσιγγενόρεμα’ παρατηρούνται μαιανδροειδείς γλυφές (Meanderkarren), οι οποίες αποτελούν γλυφές με μορφή αυλακιών και ελικοειδές σχήμα. Ο σχηματισμός τους οφείλεται στη χαμηλή ταχύτητα ροής του νερού (εικόνα 28).



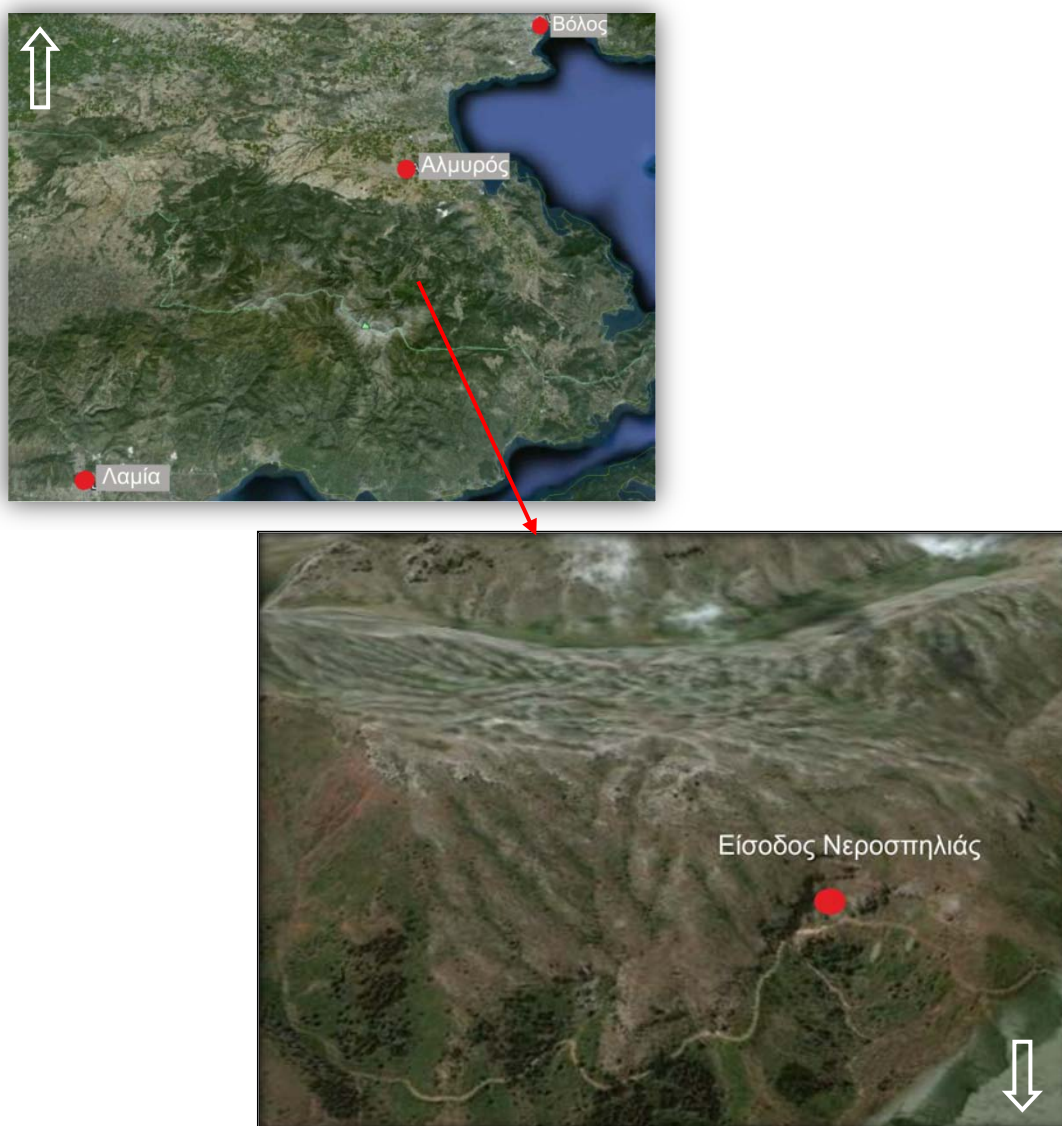
Εικόνα 24: Παρατήρηση των μαιανδροειδών γλυφών (meanderkarren) στην περιοχή μελέτης.

Τχνη βροχής (Rainpits)

Αυτές οι μορφές καρστικής διάλυσης είναι διάσπαρτες σε όλη τη περιοχή μελέτης. Αποτελούν μικρές κοιλότητες διαμέτρου μέχρι και 1cm και δημιουργούνται από σταγόνες βροχής οι οποίες δε ρέουν και διαλύουν τοπικά το πέτρωμα.

7.3 Σπήλαιο «Νεροσπηλιά» Όθρυς

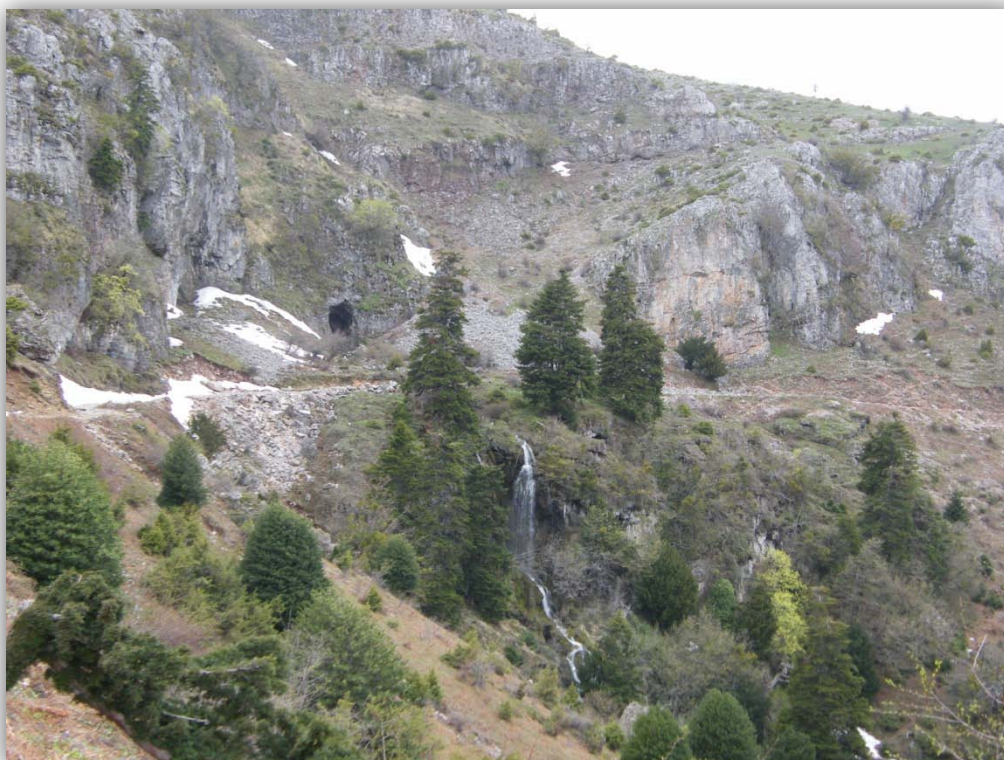
Η είσοδος της Νεροσπηλιάς βρίσκεται στο όρος Όθρυς, 6,6Km νοτιοδυτικά του χωριού Κοκκωτοί και 6,4Km δυτικά του χωριού Αγ. Ιωάννης. Συγκεκριμένα, βρίσκεται στο βόρειο τεκτονικού πρσανούς σε υψόμετρο 1257m. Η περιοχή της εισόδου χαρακτηρίζεται από μεγάλα μεταπτωτικά ρήγματα, το μεγαλύτερο κανονικό ρήγμα της περιοχής έχει δημιουργήσει φυσικό καταρράκτη ύψους 87m (εικόνα 31).



Εικόνα 29: Γεωγραφική τοποθέτηση της εισόδου της «Νεροσπηλιάς».



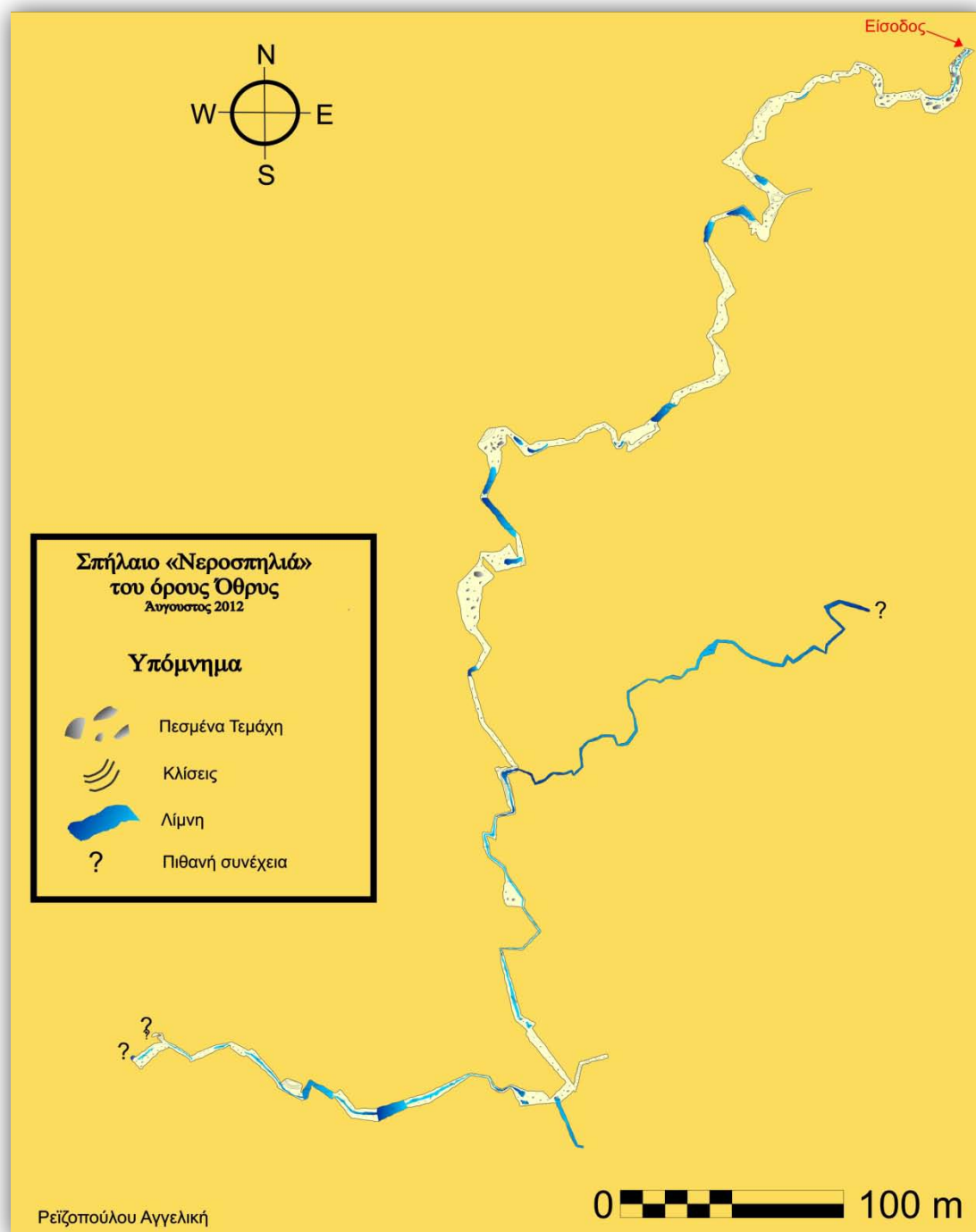
Εικόνα 30: Άποψη της εισόδου της «Νεροσπηλιάς».



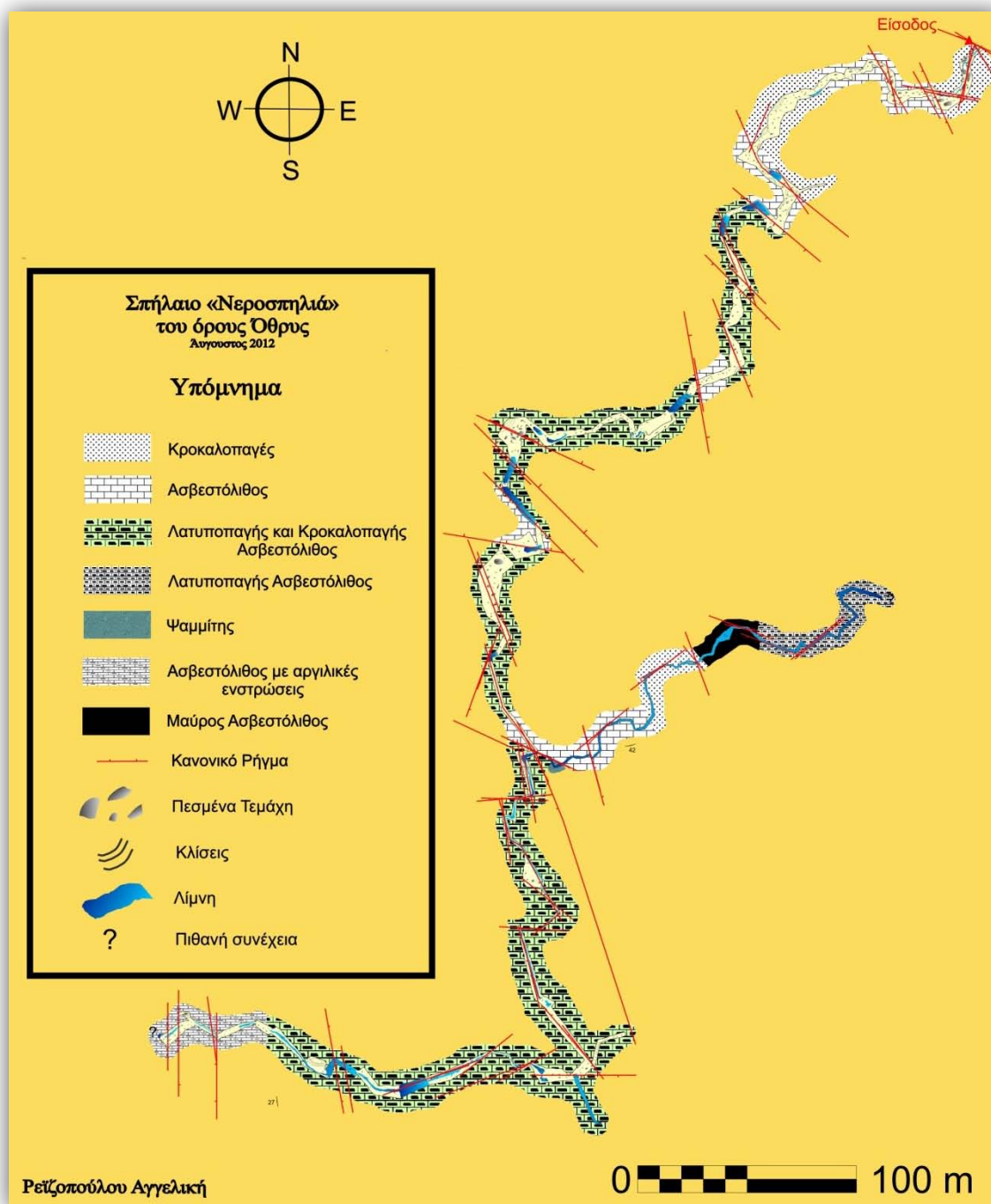
Εικόνα 31: Άποψη του φυσικού καταρράκτη της «Νεροσπηλιάς».

7.3.1 Χαρτογράφηση του Σπηλαίου «Νεροσπηλιά»

Η χαρτογράφηση της Νεροσπηλιάς έγινε (όπως προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο 6.1.3) με τον κλασικό τρόπο, συνολικά δημιουργήθηκαν 227 σταθμοί και 1362 μετρήσεις. Το σπήλαιο όπως προκύπτει από την χαρτογράφηση του, έχει συνολικό μήκος χαρτογραφημένων διαδρόμων 1419 m. Επίσης, με το πέρας της αποτύπωσης του σπηλαίου χαρτογραφήθηκαν και οι πετρολογικοί σχηματισμοί του δαπέδου της Νεροσπηλιάς, καθώς επίσης και τα γεωλογικά ρήγματα (εικόνα 33).



Εικόνα 32: Αποτύπωση του σπηλαίου «Νεροσπηλιά» σε κάτοψη.



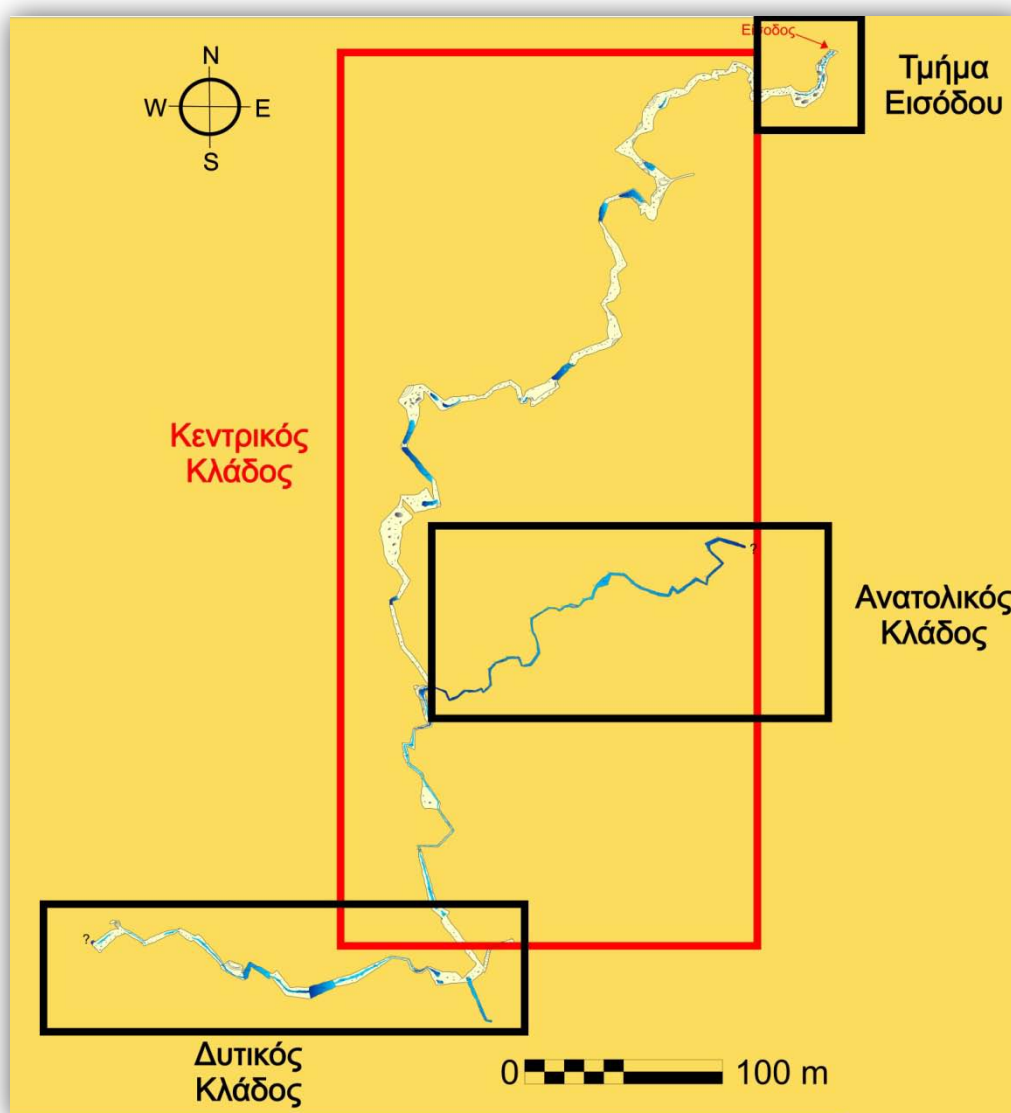
Εικόνα 33: Αποτύπωση των γεωλογικών σχηματισμών του σπηλαίου της Νεροσπηλιάς σε κάτοψη.

7.3.2 Περιγραφή Σπηλαίου «Νεροσπηλιάς»

Η Νεροσπηλιά έχει συνολικό μήκος διαδρόμων 1419m και διανοίγεται σε κύριο άξονα Β-Ν. Υπάρχουν δύο επιμέρους διακλαδώσεις, η μία στο κεντρικό τμήμα του σπηλαίου διεύθυνσης ΑΒΑ-ΔΝΔ και η άλλη με διεύθυνση Α-Δ στη νότια απόληξη του κύριου αγωγού.

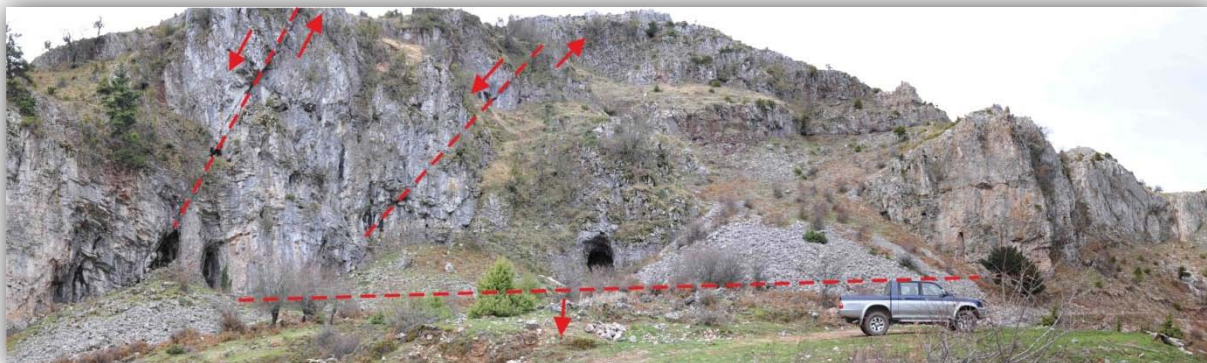
Αναλυτικά, το σπήλαιο είναι δυνατόν να χωριστεί σε τέσσερις επιμέρους κλάδους (εικόνα 34):

- Τμήμα Εισόδου
- Κεντρικός Κλάδος
- Ανατολικός Κλάδος
- Δυτικός Κλάδος



Εικόνα 34: Άποψη των επιμέρους τμημάτων της Νεροσπηλιάς.

Τμήμα Εισόδου: η είσοδος έχει διαστάσεις 4,08m x 9.6m (πλάτος x ύψος) και βρίσκεται σε υψόμετρο 1257m. Οι γεωγραφικές συντεταγμένες της εισόδου είναι 390266-4320417 (ΕΓΣΑ '87). Η υψομετρική διαφορά μεταξύ της εισόδου και του νοτιότερου σημείου χαρτογράφησης είναι 21m.

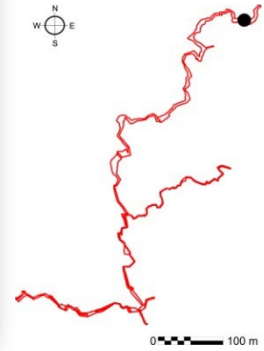


Εικόνα 35: Παρατήρηση των μεταπτωτικών ρηγμάτων στην είσοδο της Νεροσπηλιάς.

Η είσοδος του σπηλαίου τοποθετείται στη βάση τεκτονικού πρανούς διεύθυνσης ΒΔ-ΝΑ. Στα περιθώρια του πρανούς εκατέρωθεν της εισόδου υφίστανται ασβεστολιθικά κορήματα (εικόνα 32). Η είσοδος παρουσιάζει τη μεγαλύτερη παροχή νερού σε σχέση με τα άλλα τμήματα του σπηλαίου. Στο δάπεδο της εισόδου παρατηρείται κροκαλοπαγές ενώ ο αρχικός αγωγός του σπηλαίου ακολουθεί τεκτονικό ρήγμα με διεύθυνση Β-Ν και ΒΒΑ-ΝΝΔ.



Εικόνα 36: Άποψη της παροχής στην περιοχή της εισόδου της Νεροσπηλιάς (κατά τη χειμερινή περίοδο).



Εικόνα 37: Παρατήρηση κροκαλοπαγών στο Τμήμα Εισόδου της Νεροσπηλιάς.

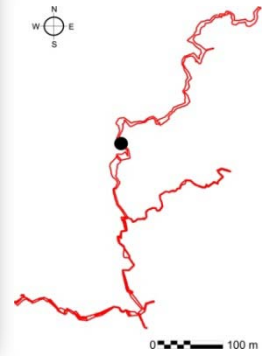
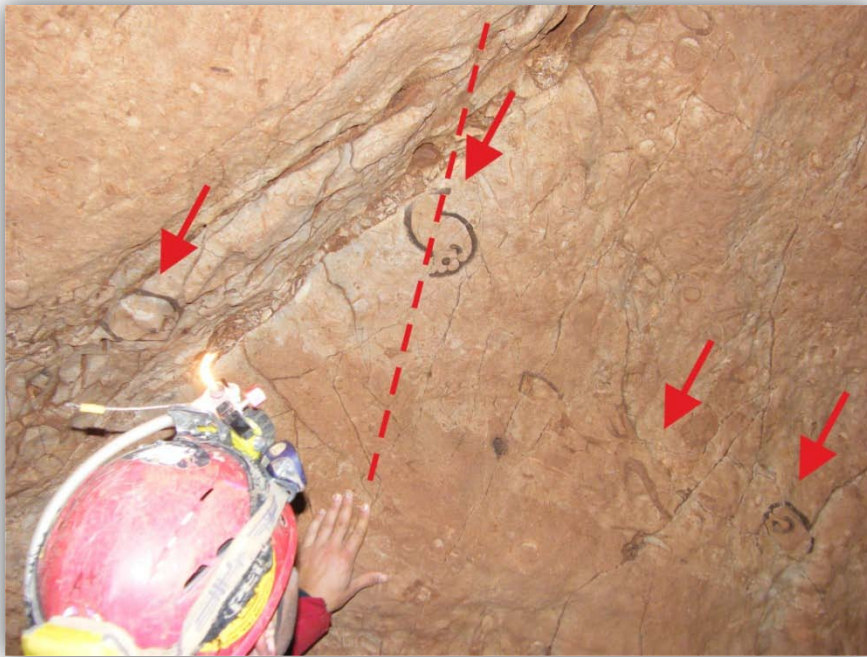


Εικόνα 38: Άποψη του Τμήματος Εισόδου.

Κεντρικός Κλάδος: Ο αρχικός άξονας από την είσοδο του σπηλαίου έχει διεύθυνση BBA-NNΔ, ενώ κάμπτεται στη συνέχεια σε διεύθυνση B-N. Η συνέχεια του Κεντρικού κλάδου διακόπτεται από κανονικά ρήγματα διεύθυνσης BA-NΔ, ενώ χαρακτηρίζεται και από την παρουσία δύο επιμέρους κλάδων του ανατολικού και του δυτικού. Η ύπαρξη μεγάλων αιθουσών είναι χαρακτηριστική στο Κεντρικό κλάδο του σπηλαίου, στα οποία παρατηρούνται πεσμένα τεμάχια (εικόνα 39). Επίσης, αξιοσημείωτη είναι η ύπαρξη απολιθωμάτων σε τοιχώματα του σπηλαίου. Κυρίως διακρίνονται Ιππουρίτες και άλλοι Ρουδιστές του Άνω Κρητιδικού (εικόνα 40).



Εικόνα 39: Ο μεγαλύτερος θάλαμος του σπηλαίου με τις μέγιστες καταρρεύσεις.



Εικόνα 40: Άποψη ιππουριτών. Διακρίνεται η διάρρηξη του λόγω ύπαρξης μεταπτωτικού ρήγματος.



Εικόνα 41: Τμήμα του Κεντρικού Κλάδου του σπηλαίου.



Εικόνα 42: Άποψη από το Κεντρικό κλάδο. Διακρίνονται αποθέσεις αργιλικού υλικού.



Εικόνα 43: Το ίχνος από την ανώτερη στάθμη του νερού είναι ορατό στα αργιλικά τοιχώματα του σπηλαίου.

Ανατολικός Κλάδος: Στο μέσο περίπου του Κεντρικού Κλάδου υφίσταται διακλάδωση διεύθυνσης ΑΒΑ-ΔΝΔ, η οποία απάγει το μεγαλύτερο μέρος νερού του νότιου τμήματος του σπηλαίου. Η διακλάδωση αυτή χαρακτηρίζεται από μαιανδρώδεις διαδρόμους (εικόνες 45 & 46), ως επί τω πλείστον πληρωμένους μέχρι το μέσο τους με νερό, σε περιόδους μικρής παροχής της Νεροσπηλιάς. Επίσης, παρατηρούνται ιππουρίτες στα τοιχώματα.



Εικόνα 44: Παρατήρηση Ιππουρίτη στο τοίχωμα του σπηλαίου.



Εικόνα 45: Αποψη του αρχικού τμήματος του Ανατολικού Κλάδου.



Εικόνα 46: Διάδρομοι του Ανατολικού Κλάδου με μαιανδρώδη μορφή.

Δυτικός Κλάδος: Στη νότια απόληξη του Κεντρικού Κλάδου του σπηλαιίου υφίσταται η δεύτερη διακλάδωση διεύθυνσης Α-Δ (εικόνα 47), όπου σημειώνεται στροφή του σπηλαιίου προς τα δυτικά, σε αυτό το τμήμα του σπηλαιίου αξιοσημείωτη είναι η ύπαρξη πεσμένων τεμαχίων της οροφής. Στο δυτικό άκρο αυτού του κλάδου υπάρχει σифόνι από όπου προέρχεται ο μεγαλύτερος όγκος του νερού της Νεροσπηλιάς. Βορειοανατολικά του σιφονιού υπάρχει βαραθρώδες πέρασμα, άγνωστης συνέχειας.



Εικόνα 47: Το αρχικό τμήμα του Δυτικού Κλάδου.



Εικόνα 48: Άποψη ενός τμήματος από το Δυτικό Κλάδο του σπηλαιίου.



Εικόνα 49: Παρατήρηση πεσμένων τεμαχίων.

7.3.3 Ιζήματα Σπηλαίου

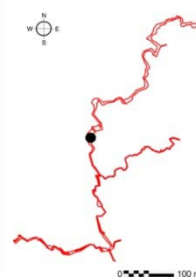
Ως ιζήματα σπηλαίων ορίζουμε τις συσσωρεύσεις ορυκτών σε διάφορα σημεία ενός σπηλαίου (σπηλαιοαποθέσεις). Διακρίνονται, όπως και στην επιφάνεια της γης σε τρεις κύριες κατηγορίες:

- Κλαστικά (άργιλλος, ιλύς, σπηλαιοάμμος, χάλικες, ογκόλιθοι κλαστικών υλικών).
- Οργανικά (Φυτογενή, Κοπρογενή, φωσφορίτες σπηλαίων).
- Χημικά (ασβεστιτικοί σχηματισμοί, γύψος, άλλα ορυκτά σπηλαίων, σχηματισμοί πάγου σε σπήλαια).

Τα ιζήματα που συναντώνται στη Νεροσπηλιά είναι τα εξής:

A) Κλαστικά Ιζήματα

Σε πολλά σημεία του σπηλαίου παρατηρούνται κλαστικά ιζήματα. Ιδιαίτερα στο Κεντρικό και στο Δυτικό Κλάδο υπάρχουν συσσωρεύσεις από κροκάλες και λατύπες (εικόνα 50), τα οποία προέρχονται από τη διάβρωση του κροκαλοπαγούς ασβεστολίθου. Επίσης, σε πολλές περιοχές του δαπέδου υπάρχει απόθεση λατύπων, καθώς και αμμωδών και αργιλικών υλικών (εικόνα 51).



Εικόνα 50: Παρατήρηση κροκαλών στο δάπεδο του σπηλαίου.



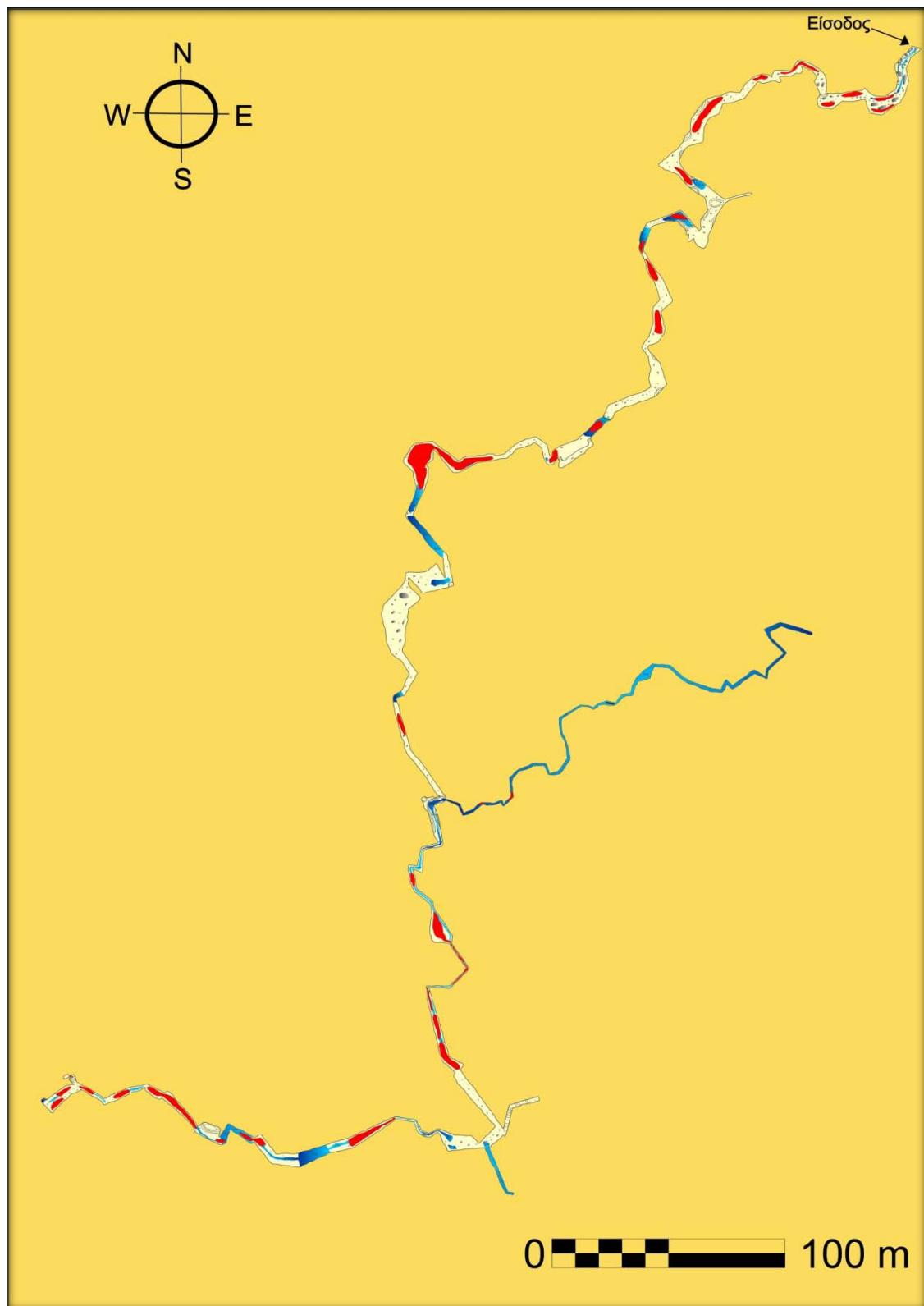
Εικόνα 51: Απόθεση αργιλικού υλικού στο Δυτικό Κλάδο του σπηλαίου.

B) Οργανικά Ιζήματα

Τα οργανικά ιζήματα προέρχονται από προϊόντα οργανικών διεργασιών, τα οποία τις περισσότερες φορές είναι αναμειγμένα με κλαστικά ή με χημικά ιζήματα. Τα κυριότερα οργανικά ιζήματα, τα οποία είναι κόπρος νυχτερίδων (γουανό) αναμειγμένος με αργιλικό υλικό παρατηρήθηκαν στη Νεροσπηλιά στα υψηλότερα σημεία των μεγάλων αιθουσών. Δεν συναντώνται σε χαμηλότερα υψομετρικά σημεία διότι παρασύρονται από τη ροή του νερού.

Γ) Χημικά Ιζήματα

Πρόκειται για δευτερογενή απόθεση του ορυκτού ασβεστίτης και αναφέρονται ως σπηλαιοθέματα. Στη συνέχεια παρατίθεται η χαρτογράφηση του σπηλαίου στο οποίο καταγράφονται οι αποθέσεις χημικών ιζημάτων.



Εικόνα 52: Συγκεντρώσεις σπηλαιοθεμάτων στη Νεροσπηλιά ανά περιοχή (σημειώνονται με κόκκινο χρώμα).

Αναλυτικά, στη Νεροσπηλιά συναντώνται τα εξής σπηλαιοθέματα:

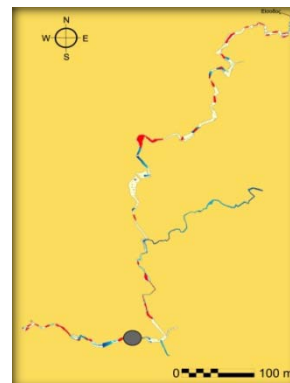
1) Σταλακτίτης

Οι σταλακτίτες αποτελούν κατακόρυφες και οξύληκτες δευτερογενείς αποθέσεις ανθρακικού ασβεστίου, συναντώνται στις οροφές του σπηλαίου, αλλά και επικρεμάμενοι από άλλα σπηλαιοθέματα. Κατά το αρχικό στάδιο δημιουργίας τους αποτελούνται από έναν ασβεστιτικό αγωγό με λεπτά τοιχώματα ομοιάζοντας με 'καλαμάκι', σε αυτό το πρωταρχικό στάδιο, όπου η διάμετρος του αγωγού είναι μερικά χιλιοστά ονομάζονται εμβρυακοί σταλακτίτες (εικόνα 53). Η τροφοδοσία σε ανθρακικό ασβέστιο γίνεται διαμέσου σταγόνας νερού που κινείται στο εσωτερικό του αγωγού. Όσο αυξάνεται η ηλικία τους αυξάνεται η διάμετρος τους και προοδευτικά κλείνει ο κεντρικός αγωγός. Η απόθεση του ανθρακικού ασβεστίου πραγματοποιείται λόγω της απώλειας CO₂, τόσο στο άκρο του σταλακτίτη, όσο και κατά της κίνησης της σταγόνας στο εσωτερικό ή στο εξωτερικό μέρος του αγωγού.

Πολλές φορές λόγω της ύπαρξης συνεχούς ρεύματος αέρα μέσα στο σπήλαιο παρατηρείται η λόξωση της ανάπτυξης του σταλακτίτη. Με αυτόν τον τρόπο συναντώνται ομάδες σταλακτιτών με χαρακτηριστική κάμψη προς την κατεύθυνση του αέριου ρεύματος.



Εικόνα 53: Άποψη εμβρυακών σταλακτιτών στο Κεντρικό Κλάδο του σπηλαίου (δεξιά τοποθετείται η θέση τους στο σπήλαιο).



Εικόνα 54: Παρατήρηση σταλακτιτών στο Δυτικό Κλάδο.

Ανάπτυξη σταλακτιτών δεν είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί σε πληρωμένους με νερό αγωγούς, αντίθετα σε αγωγούς με περιοδική πλήρωση παρατηρείται χαρακτηριστική απόθεση αργιλικού υλικού στην επιφάνεια των σταλακτιτών.

Οι σταλακτίτες δημιουργούνται σε σημεία της οροφής από όπου εξέρχονται υπέρκορα διαλύματα από ασυνέχειες του πετρώματος. Βέβαια, είναι δυνατή η δημιουργία τους και σε οποιοδήποτε άλλο σημείο της οροφής λόγω συμπύκνωσης.

Σε σημεία της οροφής με κλίση δημιουργούνται χαρακτηριστικοί σταλακτίτες με παραπετασματοειδή μορφή, οι λεγόμενες «κουρτίνες». Οι περισσότερες ‘κουρτίνες’ καταλήγουν σε σταλακτίτη (Palmer, 2003). Επίσης, δημιουργούνται στα άκρα τους χαρακτηριστικές οδοντωτές μορφές, ενώ η μάζα τους έχει ταινιωτή ανάπτυξη ανάλογα με τις διαλυμένες στη σταγόνα χρωστικές ουσίες.



Εικόνα 55. Σταλακτίτες και παραπετάσματα (κουρτίνες) σε διάδρομο του Κεντρικού Κλάδου της Νεροσπηλιάς.

2) Σταλαγμίτης

Οι σταλαγμίτες αποτελούν σπηλαιοθέματα που δημιουργούνται στα σημεία του δαπέδου των σπηλαίων όπου καταλήγει η σταγόνα με αρκετή ποσότητα ανθρακικού ασβεστίου ικανή να αποθέσει. Συνήθως, όσο πιο γρήγορος είναι ο στάγδην ρυθμός, τόσο πιο μεγάλο είναι το μέγεθος του δημιουργούμενου σταλαγμίτη.

Χαρακτηριστική είναι η απουσία σταλαγμιτών στα χαμηλότερα υψομετρικά σημεία στην Νεροσπηλιά, λόγω της παρουσίας ρέοντος νερού. Η μεγάλη παροχή που οδηγεί ακόμα και σε πλήρωση ορισμένων τμημάτων του καρστικού αγωγού της Νεροσπηλιάς δρα ενάντια στη δημιουργία σταλαγμιτών. Μόνο σε συγκεκριμένα σημεία που βρίσκονται ψηλά υψομετρικά σε σχέση με την κίνηση του νερού παρατηρείται η δημιουργία σταλαγμιτών.



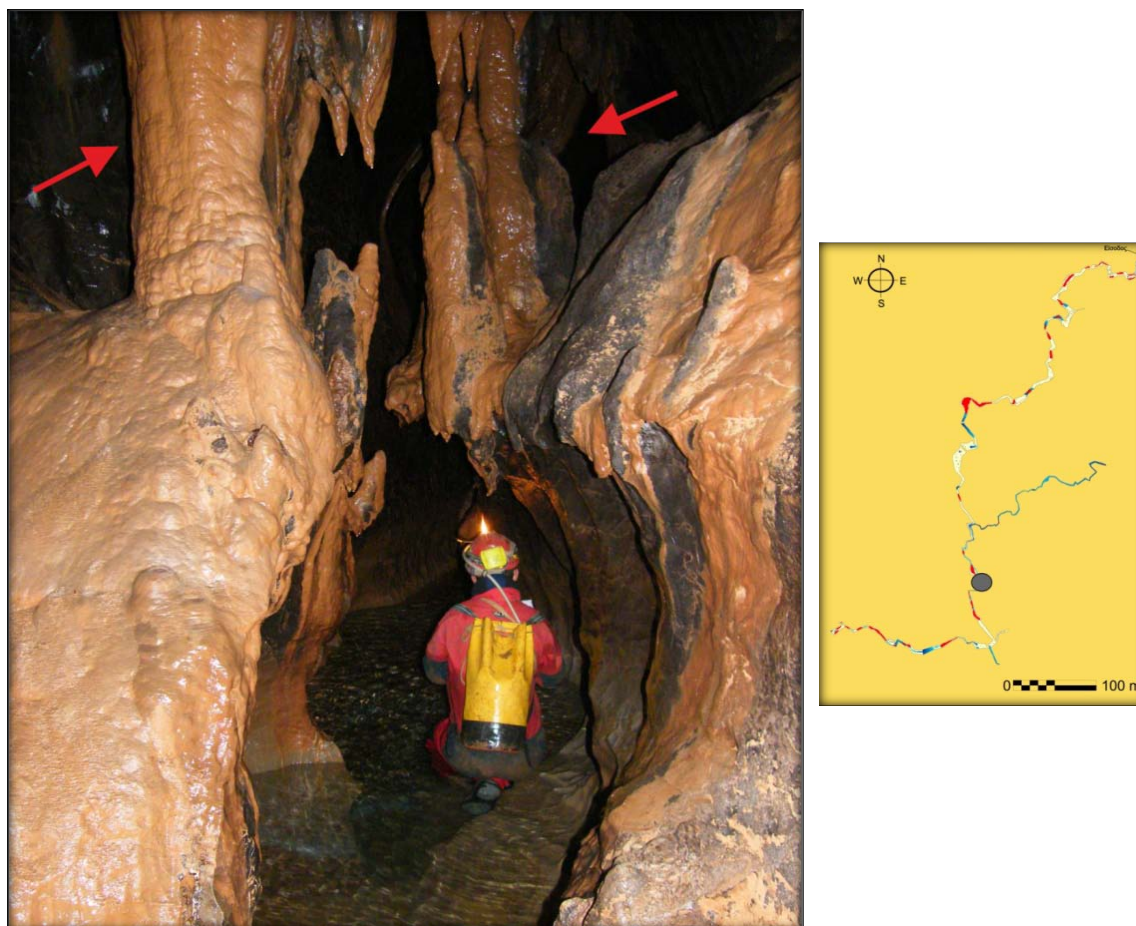
Εικόνα 56: Παρατήρηση σταλακτιτών και σταλαγμιτών στο Κεντρικό Κλάδο.



Εικόνα 57: Άποψη του σπηλαιοδιακόσμου στο Κεντρικό Κλάδο του σπηλαίου.

3) Κολώνα

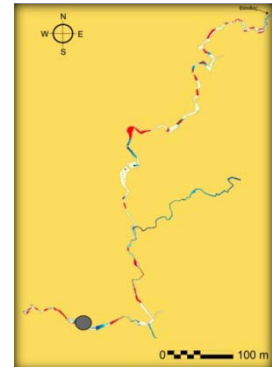
Η προοδευτική ανάπτυξη ενός σταλακτίτη και του υποκείμενου σταλαγμίτη οδηγεί στην ένωσή τους και στη δημιουργία ασβεστιτικής κολώνας (εικόνα 58). Μετά την ένωσή τους το ρέον ύδωρ συνεχίζει να αποθέτει ανθρακικό ασβέστιο στην επιφάνεια της κολώνας αυξάνοντας την διάμετρο της.



Εικόνα 58: Κολώνες σε σημείο του Κεντρικού Κλάδου.

4) Κλιμακωτές λίμνες υπερχείλισης (rimstone dams)

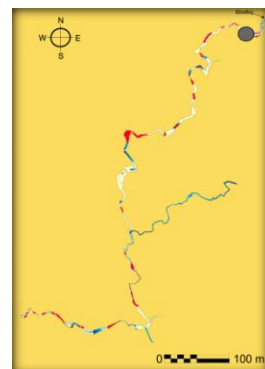
Σε πολλά σημεία της Νεροσπηλιάς παρατηρούνται φράγματα CaCO_3 δημιουργημένα κάθετα στη ροή του νερού. Στα ανάντι των φραγμάτων δημιουργούνται διαδοχικές λίμνες. Πρόκειται για κλιμακωτές λίμνες υπερχείλισης που δημιουργούνται από την υπερχείλιση νερού και απόθεση κρυσταλλικού ασβεστίτη υπό μορφή φραγμάτων (εικόνα 59). Το ύψος των φραγμάτων κυμαίνεται από μερικά χιλιοστά μέχρι 25cm. Οι μεγαλύτερες μορφές φραγμάτων υπερχείλισης παρατηρούνται σε σημεία που ήδη υπάρχουν μεγάλα εμπόδια, όπως για παράδειγμα σε σημεία εναπομείναντος τεμάχους του μητρικού ασβεστολίθου.



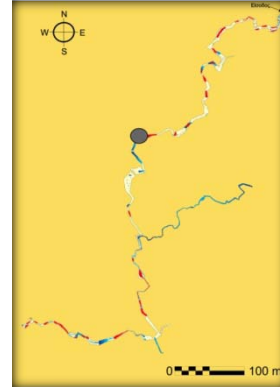
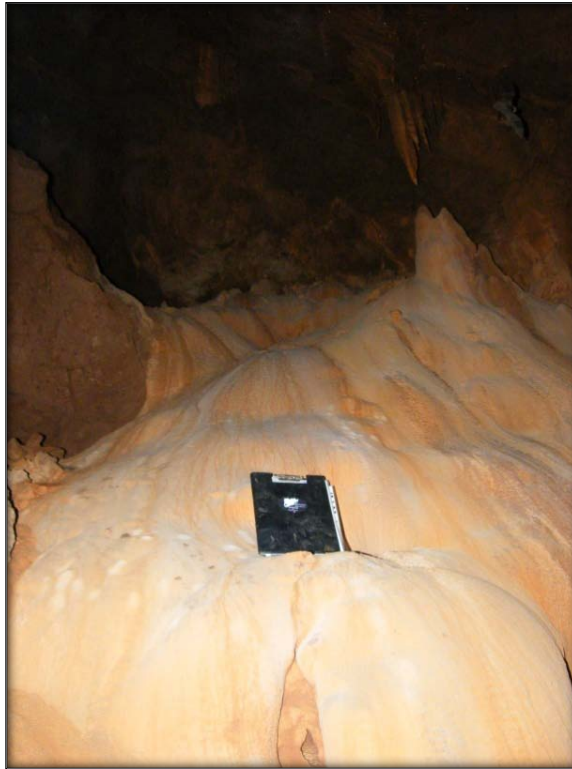
Εικόνα 59: Λίμνες υπερχείλισης παρατηρούνται στο Δυτικό Κλάδο του σπηλαίου.

5) Ρεόλιθος (flowstone)

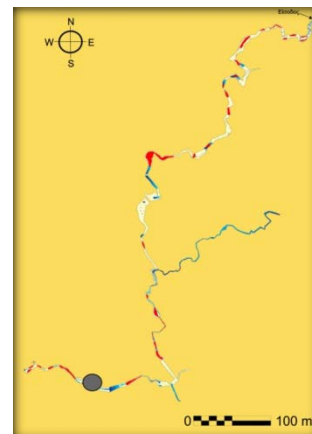
Ο ρεόλιθος αποτελεί ένα από τα πιο κοινά σπηλαιοθέματα ανθρακικού ασβεστίου CaCO_3 . Δημιουργείται σε εναέριες συνθήκες, είτε σε τοιχώματα σπηλαίων, είτε στην επιφάνεια άλλων σπηλαιοθεμάτων από την απόθεση κρυστάλλων ασβεστίτη κάθετα στην κλίση της επιφάνειας απόθεσης. Χαρακτηριστική είναι η παρουσία ρεόλιθου στο τμήμα της εισόδου της Νεροσπηλιάς (εικόνα 60).



Εικόνα 60: Δημιουργία ρεόλιθου στην Είσοδο του σπηλαίου.



Εικόνα 61: Παρατήρηση ρεόλιθου στη μεγάλη αίθουσα του Κεντρικού Κλάδου του σπηλαίου.

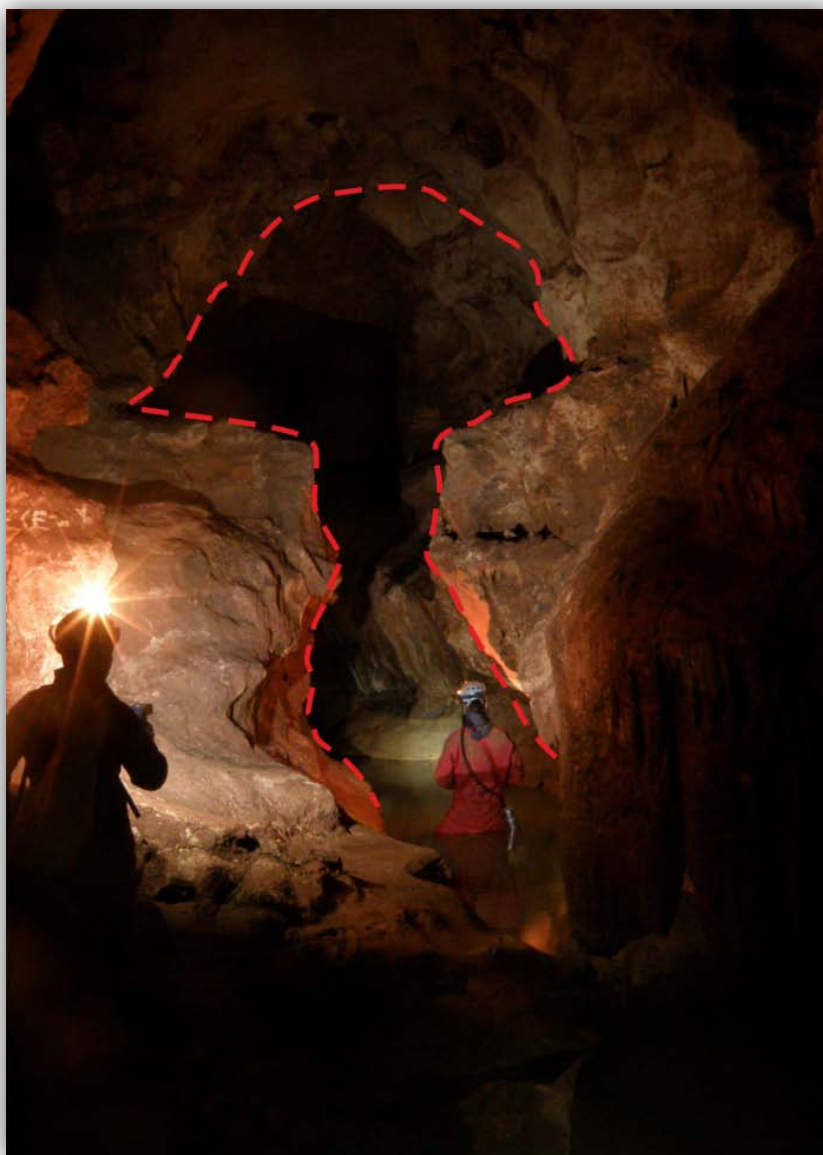


Εικόνα 62: Εντυπωσιακή απόθεση ρεόλιθου εκατέρωθεν των τοιχωμάτων του σπηλαίου.

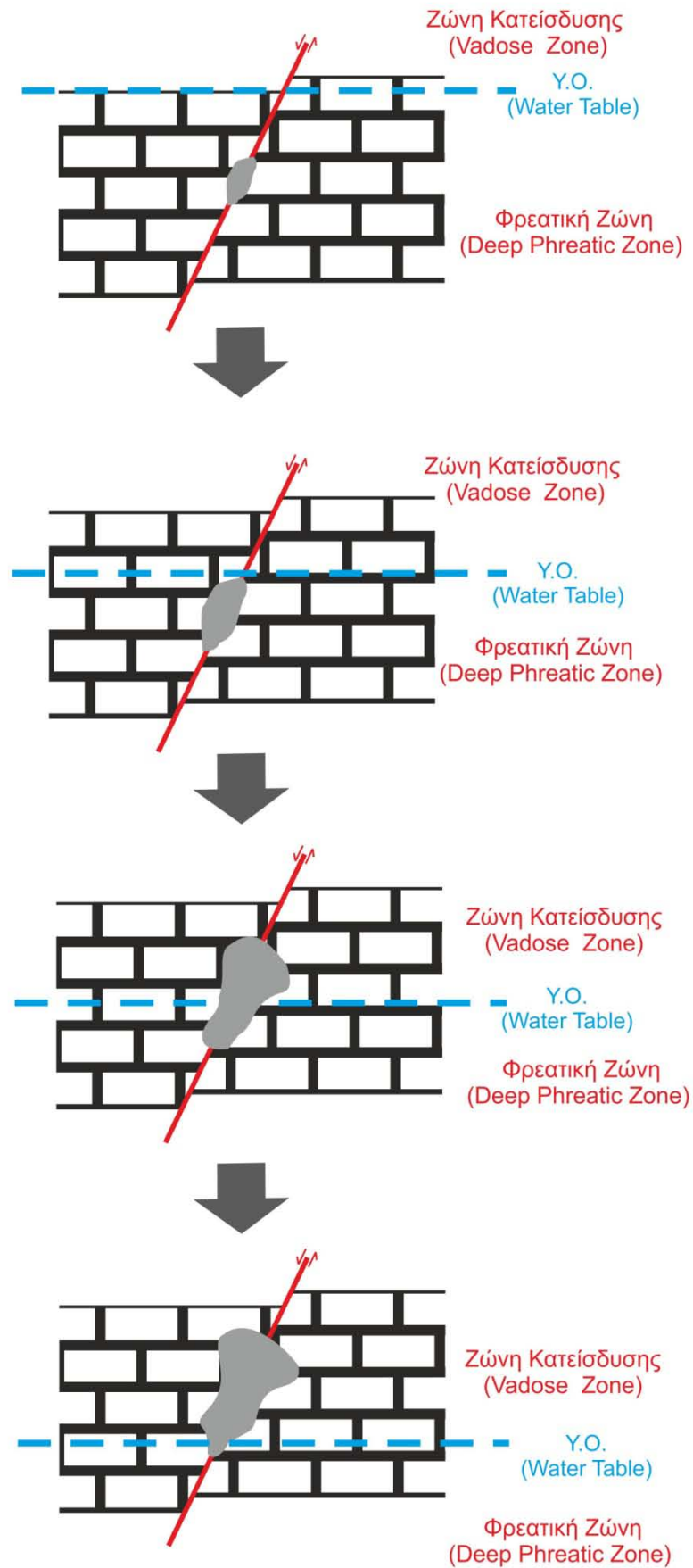
7.3.4 Σπηλαιογένεση «Νεροσπηλιάς»

Η Νεροσπηλιά αποτελεί υπόγειο καρστικό αγωγό, ο οποίος έχει περάσει από το φρεατικό στάδιο σπηλαιογένεσης στο όριο του υδροφόρου ορίζοντα (εικόνα 63). Ουσιαστικά, πρόκειται για καρστικό αγωγό που απάγει νερό από την περιοχή του Μέγα-Λάκκου προς Βορρά. Η καρστική διάβρωση ακολούθησε τις παλαιότερες τεκτονικές γραμμές. Νεότερα τεκτονικά γεγονότα ανυψώνουν την περιοχή και αποκαλύπτουν την είσοδο.

Αρχικά, δημιουργείται φρεατικός αγωγός στη μάζα του ασβεστολίθου με διεύθυνση Β-Ν ικανός να τροφοδοτηθεί με νερό κατείσδυσης από την επιφάνεια της μάζας του ασβεστολιθικού πετρώματος. Κατώτατο στεγανό όριο του υδροφορέα φαίνεται να αποτελεί το ασβεστολιθικό κροκαλοπαγές, το οποίο συναντάται κυρίως στην περιοχή της σημερινής εισόδου της Νεροσπηλιάς.



Εικόνα 63:Χαρακτηριστική διατομή του σπηλαίου μορφής «κλειδαρότρυπας». Το πάνω τμήμα της διατομής αποτελεί το φρεατικό παρελθόν του σπηλαίου, το οποίο πλέον έχει περάσει στη ζώνη κατείσδυσης (στενό πέραςμα).



Εικόνα 64: Στάδια Σπηλαιογένεσης Νεροσπηλιάς. Παρατηρείται συνεχής πτώση του υδροφόρου ορίζοντα (Y.O.) και διεύρυνση της διατομής των καρστικών αγωγών.



Εικόνα 65: Αποψη διατομής του σπηλαίου όπου διακρίνεται η φρεατική φάση (ομαλός κύκλος πάνω) και το πέρασμα στη ζώνη κατείσδυσης.

Από την έναρξη δημιουργίας της Νεροσπηλιάς η διάλυση επιτελείται από πάνω προς τα κάτω εξαιτίας της έντονης τεκτονικής ανύψωσης της Όθρυος. Στη διατομή των αγωγών φαίνεται έντονη τεκτονική ανύψωση της περιοχής και ταπείνωση του υδροφορέα. Σε πολλά σημεία έχει δημιουργήσει δύο επάλληλους καρστικούς αγωγούς (εικόνα 66) κατά μήκος του ρου της Νεροσπηλιάς. Ο πρωταρχικός καρστικός αγωγός του σπηλαίου έχει μέσες διαστάσεις 1,5x1,7m (πλάτος x ύψος) και σήμερα παρουσιάζεται ως υπολειμματικός ακριβώς πάνω από το σημερινό καρστικό αγωγό. Σε πολλά σημεία του πρωταρχικού καρστικού αγωγού παρατηρούνται χαρακτηριστικά υπό πίεσης υδροφορέα. Αυτά συνίστανται σε στροβιλοειδείς γλυφές (εικόνα 67) είτε σε σειρά, είτε διάσπαρτα στην οροφή του σπηλαίου.



Εικόνα 66: Παρατήρηση του παλαιότερου καρστικού αγωγού (σημειώνεται με κόκκινη διακεκομμένη γραμμή) σε σύγκριση με το νεότερο.

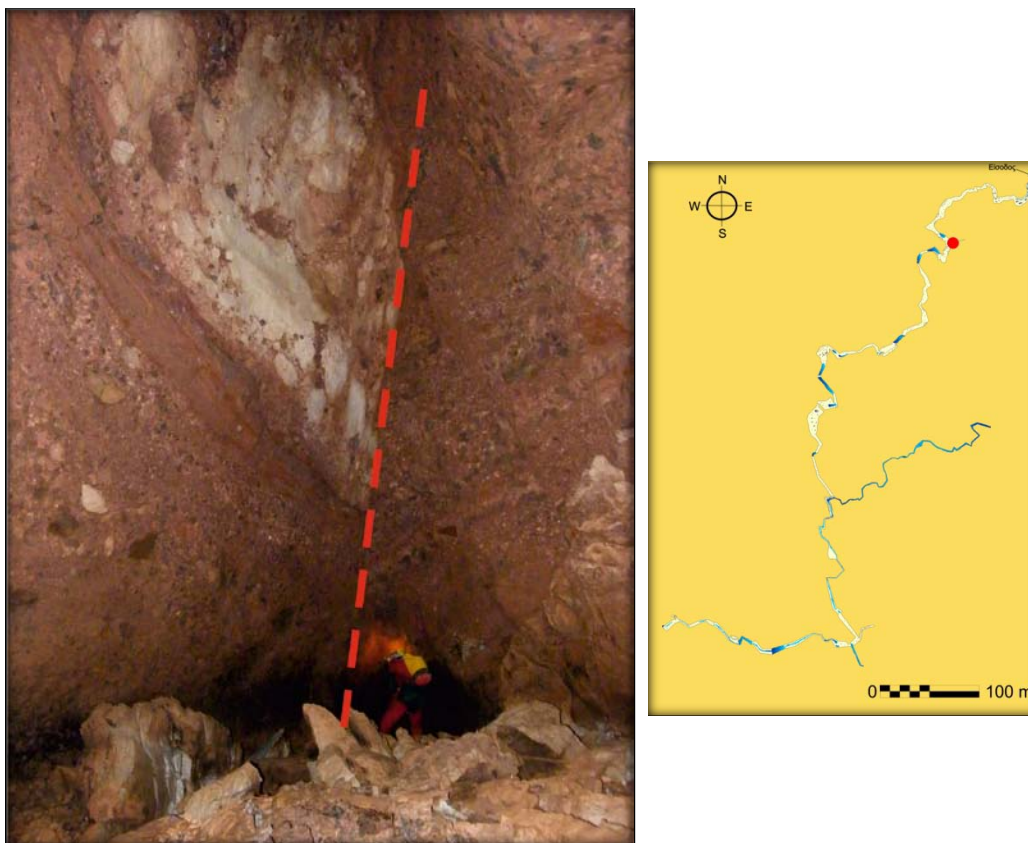


Εικόνα 67: Στροβιλοειδής γλυφές στην οροφή του σπηλαίου.

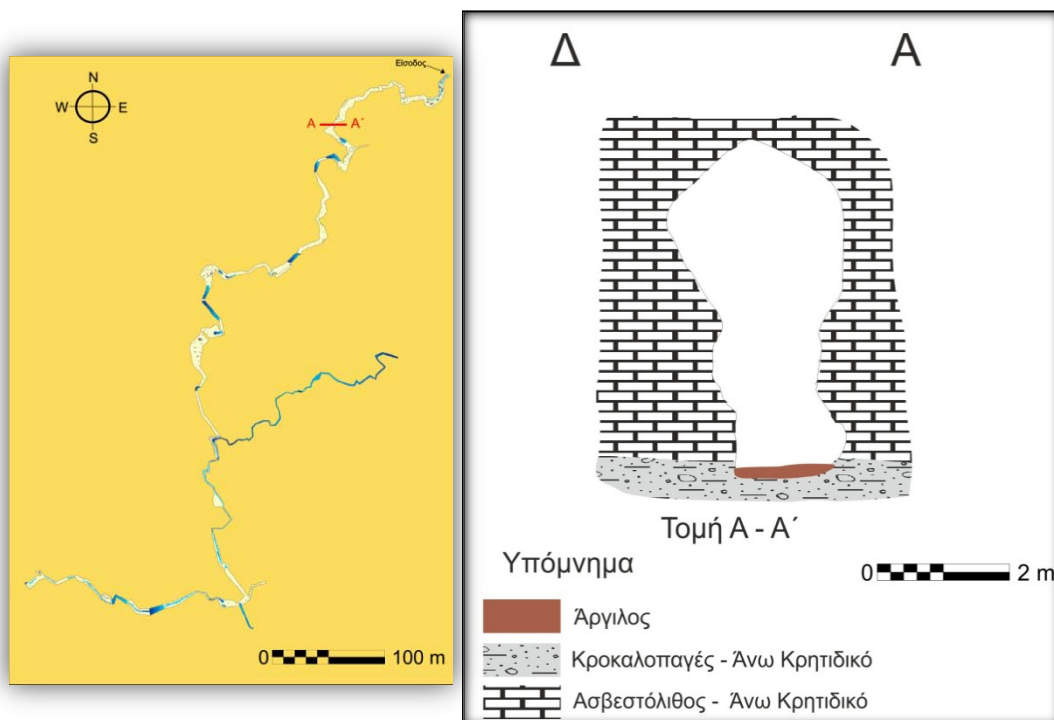
Ο σημερινός ενεργός καρστικός αγωγός βρίσκεται 4-6m βαθύτερα από τον πρωταρχικό-υπολειμματικό. Βρίσκεται σε συνθήκες πλήρωσης το χειμώνα και ημιπλήρωσης ή κατά θέσεις εκκένωσης το καλοκαίρι μέχρι την περίοδο των βροχών. Ο ανατολικός κλάδος δείχνει να αποτελεί μία νεότερη φάση της σπηλαιογένεσης που ουσιαστικά ως πειρατεία ποταμού αποκόπτει ποσότητα νερού από τον Κεντρικό κλάδο, οδηγώντας το προς ΒΑ. Η κατάληξη αυτού του κλάδου είναι άγνωστη, δεδομένου ότι η περαιτέρω εξερεύνηση του είναι αδύνατη λόγω ύπαρξης σιφονιού. Πιθανώς, ο όγκος του νερού να καταλήγει σε τραβερτινική πηγή ανατολικά της σημερινής εισόδου της Νεροσπηλιάς.

Στο σπήλαιο παρατηρούνται έντονες αλλαγές της λιθολογίας. Ο υπερκειμένος του κροκαλοπαγούς ασβεστόλιθος εμφανίζεται κατά θέσεις ψαμμιτικός με αργλικές ενστρώσεις ή και λατυποπαγή. Οι αλλαγές αυτές, η δημιουργία του ανατολικού κλάδου, όπως και η στρέψη προς ΒΑ της περιοχής της εισόδου οφείλεται στην έντονη τεκτονική της περιοχής και συγκεκριμένα στη παρουσία νεότερων μεταπτωτικών ρηγμάτων. Στο εσωτερικό του σπηλαίου έχουν καταγραφεί και χαρτογραφηθεί πάνω από 40 ρήγματα τα οποία αλλού ανυψώνουν και αλλού ταπεινώνουν τα ασβεστολιθικά τεμάχια (εικόνα 67). Ειδικά η δημιουργία του ανατολικού κλάδου και τις στρέψεις προς ΒΑ της περιοχής εισόδου οφείλονται στην παρουσία ρήγματος Β-Ν. Ο ανατολικός κλάδος μπορεί να θεωρηθεί ως το νεότερο τμήμα του σπηλαίου, αυτό τεκμαίρεται από τη μικρή του σε εμβαδόν διατομή, τις έντονες γλυφές, και τη σχετικά συχνή πλήρωσή του με νερό.

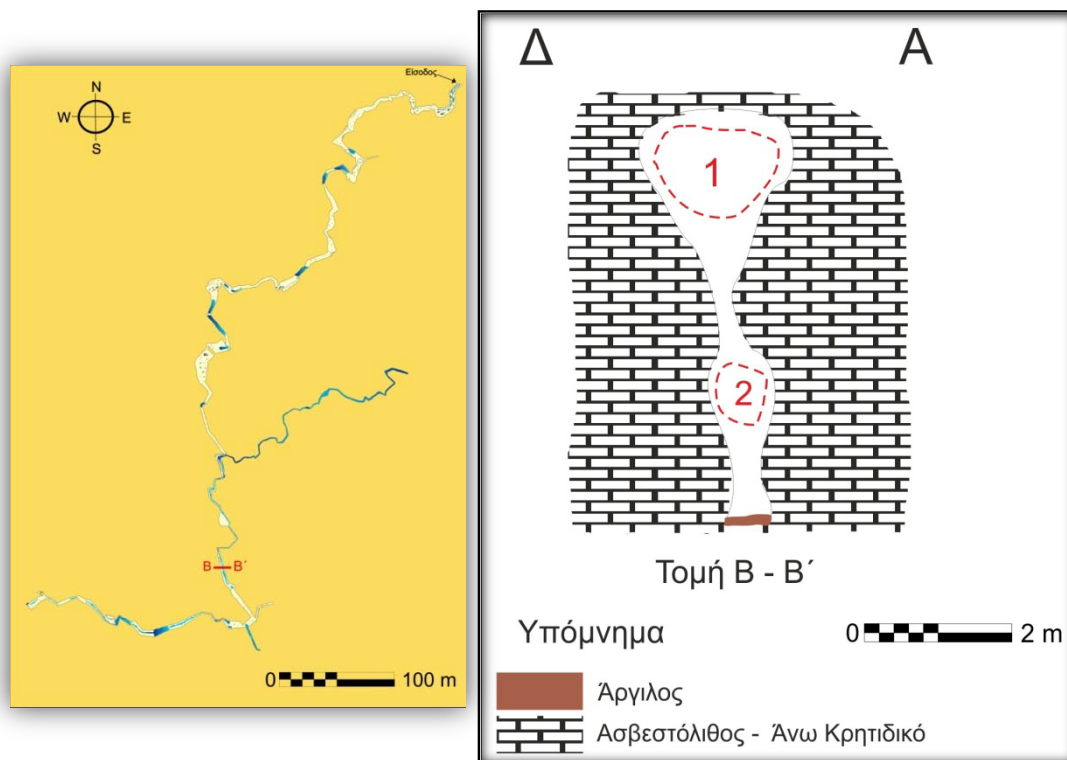
Γενικά οι χαρτογραφημένες διατομές του σπηλαίου αποδεικνύουν τη λειτουργία της Νεροσπηλιάς σε φρεατικές συνθήκες, την έντονη ανύψωση λόγω τεκτονικής και την προχώρηση της διάλυσης μέχρι το σχετικά αδιαπέρατο στρώμα των κροκαλοπαγών (εικόνα 68- Τομή 1).



Εικόνα 67: Παρατήρηση μεταπτωτικού ρήγματος.

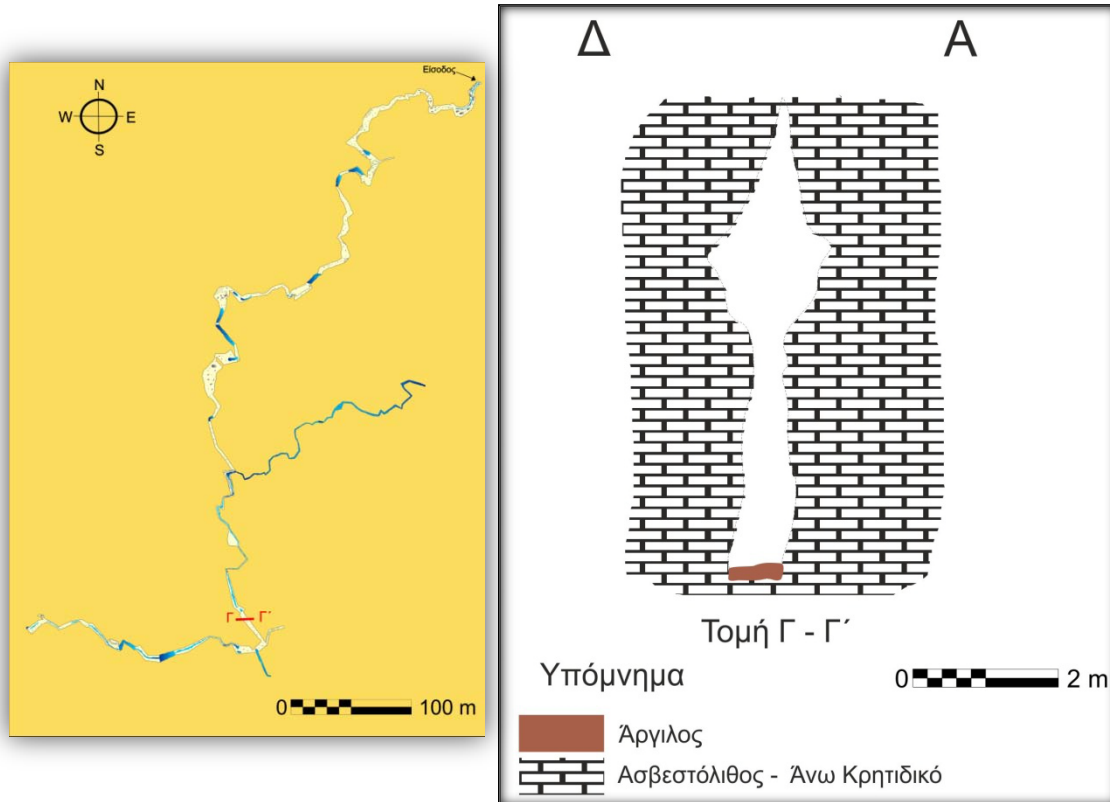


Εικόνα 68: Τομή A – Α'. Παρατήρηση ενός αγωγού από την περιοχή της εισόδου του σπηλαίου.



Εικόνα 69: Τομή B – B' από την περιοχή του βασικού κλάδου. Διακρίνονται οι δύο φρεατικές φάσεις του σπηλαίου (1 & 2), καθώς και το πέρασμα στη ζώνη κατείσδυσης.

Σήμερα, η ελεύθερη επιφάνεια του νερού της Νεροσπηλιάς αποτελεί την πιεζομετρική επιφάνεια του τοπικού υδροφόρου ορίζοντα με κίνηση από ΝΔ προς ΒΑ. Η κατά βάθος διάβρωση συνεχίζεται στο δυσδιάλυτο ασβεστολιθικό κροκαλοπαγές, κυρίως στην περιοχή της εισόδου.



Εικόνα 70: Τομή Γ –Γ’ από την περιοχή του Κεντρικού Κλάδου. Παρατηρείται η αρχική διάλυση του ασβεστολίθου (στη φρεατική φάση) και η μετέπειτα κατά βάθος διάβρωση του.



Εικόνα 71: Χαρακτηριστική διατομή αγωγού στη Νεροσπηλιά χωρίς την παρωδία νερού (θερινή περίοδος). Διακρίνεται πάνω η φρεατική φάση του σπηλαίου, οι μικρότερες προεξοχές (notches) οφείλονται και σε στρωματογραφικές εναλλαγές.

Ο καρστικός αγωγός ακόμα και σήμερα δείχνει σημάδια πλήρωσης. Στο εσωτερικό του στα υψηλότερα μέρη συναντώνται πληθυσμοί νεκρών νυχτερίδων γεγονός που δείχνει την πολύμηνη διάρκεια πλήρωσης του αγωγού με νερό.

Κατά θέσεις στη Νεροσπηλιά παρατηρούνται αποθέσεις χονδρόκοκκων και λεπτόκοκκων υλικών. Στα χαλαρά αυτά ιζήματα παρατηρείται κατά βάθος διάβρωση λόγω της έντονης τεκτονικής ανύψωσης. Στα τοιχώματα του σπηλαίου στο μητρικό πέτρωμα, αλλά και στα κλαστικά ιζήματα παρατηρούνται ίχνη της ροής του νερού notches (εικόνα 72). Επίσης στο νεότερο κλάδο του σπηλαίου (Ανατολικό) παρατηρούνται έντονα σημάδια της καρστικής διάλυσης λόγω της κίνησης του υπόγειου ποταμού (εικόνες 73-74).



Εικόνα 72: Ίχνη ροής του νερού (notches).



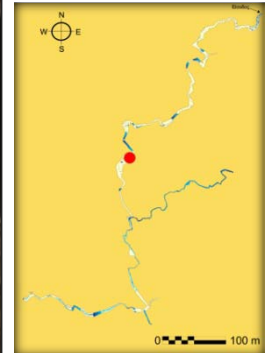
Εικόνα 73: Μορφές διάλυσης.



Εικόνα 74: Γλυφές διάλυσης.



Εικόνα 75: Μορφή διάλυσης από στροβιλισμό νερού.



Εικόνα 76: Αποψη της κατοπτρικής επιφάνειας ρήγματος που οδηγεί στην αλλαγή κατεύθυνσης του ρου της Νεροσπηλιάς.

Σε πολλά τμήματα του σπηλαίου η στρέψη της ροής και του προσανατολισμού των διαδρόμων οφείλεται στην ύπαρξη ρηγμάτων. Σε πολλές περιπτώσεις τα ρήγματα αυτά είναι πλήρως καλυμμένα από σπηλαιοθέματα ενώ σπάνια είναι διακριτή η κατοπτρική επιφάνεια (εικόνα 76).

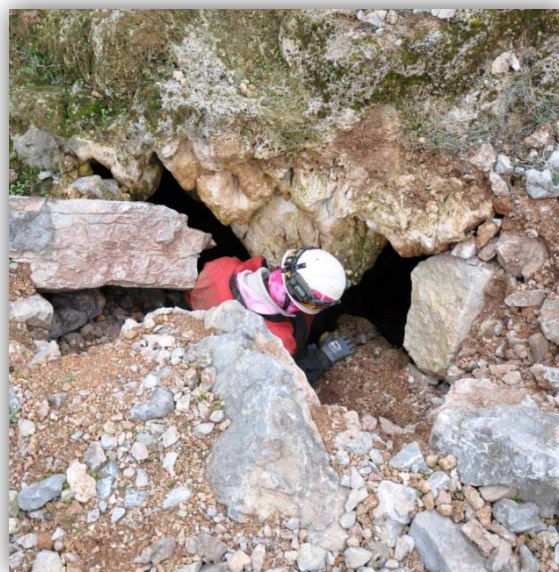
Η εξέλιξη της σπηλαιογένεσης στη Νεροσπηλιά θα οδηγήσει σε μεγαλύτερων διαστάσεων σε βάθος καρστικού αγωγού. Ο διευρυμένος αυτός καρστικός αγωγός θα χαρακτηρίζεται από καταρρευσιγενή μορφολογία. Τα πεσμένα τεμάχια θα απομακρύνονται λόγω της έντονης διάλυσης του ρέοντος νερού. Η συγκεκριμένη μορφή σπηλαίου παρατηρείται σήμερα στις τρεις μεγάλες αίθουσες του σπηλαίου. Στη συνέχεια λόγω της ταπείνωσης του υδροφόρου ορίζοντα η Νεροσπηλιά θα εκκενωθεί εντελώς, χαρακτηριζόμενη ως οριζόντιο σπήλαιο.

7.4 Σπήλαιο «Δρόμου»

Το σπήλαιο «Δρόμου» τοποθετείται 80m ΒΑ της εισόδου της Νεροσπηλιάς. Πρόκειται για τραβερτινικό σπήλαιο που διανοίγεται σε μία ευρείας έκτασης απόθεση τραβερτινικού υλικού στην περιοχή εισόδου της Νεροσπηλιάς.



Εικόνα 77: Αποψη της τοποθέτησης του σπηλαίου «Δρόμου» (Διακρίνεται πίσω δεξιά η είσοδος της «Νεροσπηλιάς»).



Εικόνα 78: Η είσοδος του σπηλαίου.

Το πάχος των τραβερτινικών ιζημάτων είναι περίπου 20m. Στο βόρειο τμήμα της τραβερτινικής απόθεσης σχηματίζεται καταρράκτης ύψους περίπου 86m, στο μέτωπο του οποίου παρατηρούνται δεκάδες άλλα μικρά σπηλαιώματα. Η είσοδος του σπηλαίου, όπως μαρτυρά και το όνομα του, βρίσκεται ακριβώς στο μέσο του χωματόδρομου που οδηγεί στη Νεροσπηλιά.

Η αποτύπωση του σπηλαίου πραγματοποιήθηκε με τη χρήση γεωλογικής πυξίδας, μετροταινίας και αποστασιόμετρου.



Εικόνα 79: Η χαρτογραφική αποτύπωση του σπηλαίου «Δρόμου».

7.4.1. Περιγραφή – Ιζήματα Σπηλαίου

Η είσοδος του σπηλαίου έχει διαστάσεις 0,65x0,40m (πλάτος x ύψος). Στην περιοχή της εισόδου σχηματίζεται κώνος κορημάτων, ο οποίος καταλήγει σε δύο επιμέρους τμήματα του τραβερτινικού σπηλαίου. Ο άξονας του ενός τμήματος διεύθυνσης Α-Δ έχει μήκος 3,2m ενώ ο άξονας του τμήματος με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ έχει μήκος 5,4m. Σε όλα τα τοιχώματα του σπηλαίου παρατηρείται η δημιουργία του σπηλαιοθέματος κοράλλια σπηλαίων, το συγκεκριμένο σπηλαιοθέμα σχετίζεται με την έντονη εξάτμιση νερού που υπό υμενώδους μορφής ανέρχεται τριχοειδώς στα τοιχώματα του σπηλαίου. Επίσης, παρατηρούνται σταλακτίτες καθώς και ρεόλιθοι.

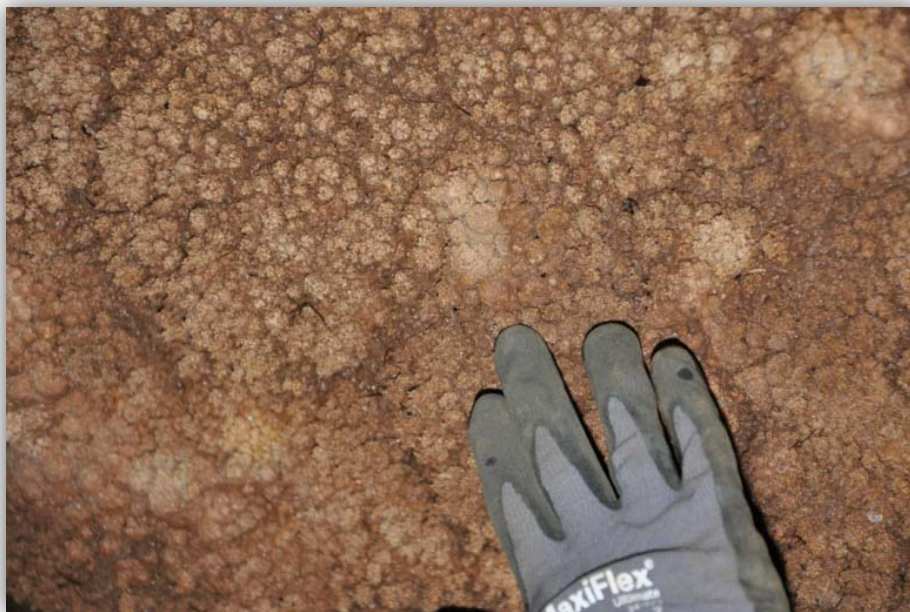
Σε πολλά σημεία των τοιχωμάτων φυτικά στοιχεία όπως κλαδιά, φύλλα κ.α. περιλιθώνονται από την απόθεση ανθρακικού ασβεστίου στην επιφάνειά τους (εικόνα 80). Χαρακτηριστική είναι η μη ύπαρξη σταλαγμιτών, λόγω της συγκέντρωσης νερού στο δάπεδο του σπηλαίου. Πολλές φορές το νερό πληρώνει το μεγαλύτερο μέρος του σπηλαίου, αφήνοντας χαρακτηριστικό ίχνος στα τοιχώματα (εικόνα 81).



Εικόνα 80: Περιλιθωμένα κλαδιά στα τοιχώματα του σπηλαίου.



Εικόνα 81: Άποψη της αίθουσας του σπηλαίου. Διακρίνεται το ίχνος του νερού.



Εικόνα 82:Κοράλλια σπηλαίων στο εσωτερικό του σπηλαίου.

7.4.2 Σπηλαιογένεση

Το σπήλαιο «Δρόμου» αποτελεί πρωτογενές σπήλαιο. Δημιουργήθηκε παράλληλα με την απόθεση του τραβερτινικού πετρώματος. Η έντονη απόθεση ανθρακικού ασβεστίου προερχόμενου από τα νερά της Νεροσπηλιάς πάνω σε ανθρακικά κορήματα και φυτικά στοιχεία δημιούργησε και συνεχίζει να δημιουργεί τις τραβερτινικές αποθέσεις στην περιοχή εισόδου της Νεροσπηλιάς. Η απόθεση ανθρακικού ασβεστίου, από το κρύο νερό της Νεροσπηλιάς (~9°C) που εισέρχεται μέσα σπήλαιο «Δρόμου», συνεχίζει να λαμβάνει χώρα δημιουργώντας χημικά ιζήματα, όπως σταλακτίτες, σταλαγμίτες, κοράλλια των σπηλαίων. Η συνεχιζόμενη δευτερογενής απόθεση ανθρακικού ασβεστίου μέσα στο σπήλαιο θα έχει ως προοδευτικό αποτέλεσμα την πλήρωση του με τραβερτινικά σπηλαιοθέματα.

Το τραβερτινικό αυτό σπήλαιο έχει διακλαδωτή μορφή χαρακτηριστική για τα σπήλαια που διανοίγονται σε τραβερτίνες και ανθρακικούς τόφους. Ανάλογη μορφή παρουσιάζουν τα μικρά σπηλαιώματα στο μέτωπο του καταρράκτη που αποτελούν υπολείμματα διάβρωσης παλαιότερων τραβερτινικών σπηλαίων.



Εικόνα 83: Παρατήρηση της κίνησης των νερών, προερχόμενα από τη Νεροσπηλιά προς το τραβερτινικό σπήλαιο.

8. Υδρολογία περιοχής μελέτης

8.1 Ανάλυση Υδροχημικών στοιχείων της «Νεροσπηλιάς»

Η Ηλεκτρική Αγωγιμότητα (EC) του νερού στην είσοδο της Νεροσπηλιάς μετρήθηκε 190 $\mu\text{S}/\text{cm}$, γεγονός που σημαίνει ότι το νερό κατεισδύει πολύ γρήγορα μετά τη βροχόπτωση και εκφορτίζεται άμεσα από την πηγή σε σύντομο χρονικό διάστημα, με αποτέλεσμα να μην φορτιστεί με άλατα. Η τιμή αυτή είναι χαρακτηριστική για το υπόγειο καρστικό νερό. Το σύνολο των διαλυμένων στερεών (TDS) στο ίδιο σημείο μετρήθηκε 122,1mg/l που δείχνει ότι, σύμφωνα με την ταξινόμηση Hem, 1970 πρόκειται για γλυκό νερό.

Επίσης, το pH είναι 8,3, λόγω της έντονης διάλυσης των ανθρακικών πετρωμάτων. Η αλκαλική αυτή τιμή του pH δείχνει ότι το νερό είναι αρκετά «νέο», δηλαδή υπάρχει ταχύτατη ανανέωση (Βουδούρης, 2009). Οι καρστικοί αγωγοί έχουν διευρυνθεί λόγω της καρστικής διάβρωσης με αποτέλεσμα το νερό που εισρέει από τις καταβόθρες ταχύτατα να εξέρχεται από τις πηγές.

Η ταχύτατη αυτή κίνηση του νερού μέσα στο καρστικό σύστημα αποδεικνύεται και από την μικρή περιεκτικότητα σε ασβέστιο που μετρήθηκε (42,8mg/l). Είναι ένδειξη ταχείας κατεισδυσσης και εμπλουτισμού του καρστικού υδροφορέα.

Η χαμηλή τιμή των ιόντων μαγνησίου (1mg/l) δείχνει ότι κατά την κίνηση του, το υπόγειο καρστικό νερό της Νεροσπηλιάς δε συναντάει δολομιτικές στρώσεις ή

μαγνησιούχα ορυκτά των οφιολίθων. Ομοίως, οι χαμηλές τιμές νατρίου (1,5mg/l), καλίου (0,2mg/l) και χλωρίου (2,3mg/l), αλλά και των συνηθισμένων σε ανθρακικά πετρώματα όξινων ανθρακικών ιόντων (125 mg/l) δείχνουν σύντομη παραμονή μέσα στο υπόγειο καρστικό σύστημα. Επίσης, οι χαμηλές τιμές νιτρικών (4,4 mg/l) και θεικών ιόντων (1mg/l) δείχνουν την αναμενόμενη μη ανθρωπογενή επέμβαση με λιπάσματα και άλλες οργανικές αποθέσεις.

8.2 Παροχή νερού-Βροχομετρικά δεδομένα

Η παροχή νερού που μετρήθηκε για ένα περίπου έτος (Αύγουστος 2011 έως Απρίλιο 2012) στην καρστική πηγή Νεροσπηλιάς (σημείο εισόδου) κυμάνθηκε από 0,78 m³/h (Σεπτέμβριος 2011) έως 255 m³/h (Απρίλιος 2012). Από την παρατήρηση του πίνακα των μετρημένων παροχών γίνεται αντιληπτό ότι ο Κεντρικός Κλάδος της Νεροσπηλιάς τροφοδοτεί με νερό τα δύο επιμέρους βασικά τμήματα, δηλαδή τον κλάδο προς την είσοδο του σπηλαίου και τον ανατολικό. Παρόλ' αυτά παρατηρείται, όπως είναι και αναμενόμενο, μεγάλο ποσοστό του νερού να διοχετεύεται σε άλλους μη παρατηρήσιμους καρστικούς αγωγούς. Μικρή εκροή νερού παρατηρείται σε σημείο ανατολικά της εισόδου της Νεροσπηλιάς.

Στα κατάντι της εισόδου του σπηλαίου, προς την αρχή του φαράγγιου, οι μετρούμενες παροχές είναι μεγαλύτερες σε σχέση με τη συνολική παροχή στο σπήλαιο, γεγονός που εξηγείται από την τροφοδοσία του ρέματος της Νεροσπηλιάς και από άλλους μικρότερους χειμάρρους.

Η παροχή νερού στη Νεροσπηλιά, όπως και στο χείμαρρο της Νεροσπηλιάς είναι άμεσα συνδεδεμένη με το ποσό των κατακρημνισμάτων όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 1: Μετρήσιμες παροχές στη περιοχή μελέτης.

Ημερομηνία	Θέση	Παροχή (m ³ /h)	Υψος βροχής (mm)	
28/8/2011	Κεντρικός κλάδος Νεροσπηλιάς	16	0	Μέτρηση Αυγούστου
28/8/2011	Ανατολικός Κλάδος Νεροσπηλιάς	5		
28/8/2011	Είσοδος Νεροσπηλιάς	1		
28/8/2011	Χείμαρρος (Φαράγγι)	22		
18/9/2011	Κεντρικός Κλάδος Νεροσπηλιάς	7	0	Μέτρηση Σεπτεμβρίου
18/9/2011	Είσοδος Νεροσπηλιάς	0,78		
18/9/2011	Χείμαρρος (Φαράγγι)	10		
29/10/2011	Είσοδος Νεροσπηλιάς	31	3,815	Μέτρηση Οκτωβρίου
29/10/2011	Χείμαρρος (Φαράγγι)	58		

26/11/2011	Είσοδος Νεροσπηλιάς	51	15	Μέτρηση Νοεμβρίου
26/11/2011	Χείμαρρος (Φαράγγι)	83		
18/12/2011	Είσοδος Νεροσπηλιάς	55	225	Μέτρηση Δεκεμβρίου
18/12/2011	Χείμαρρος Φαράγγι	117		
17/4/2012	Είσοδος Νεροσπηλιάς	255	665	Μέτρηση μηνών Ιανουαρίου έως Απρίλιο

8.3 Ιχνηθέτηση

Για την παρούσα έρευνα του καρστικού συστήματος της Ανατολικής πλευράς της Όθρυς και συγκεκριμένα στην περιοχή της Νεροσπηλιάς – Μέγα Λάκκου πραγματοποιήθηκε ιχνηθέτηση με ευδιάλυτο άλας (NaCl). Το πείραμα πραγματοποιήθηκε με σκοπό την απόδειξη επικοινωνίας της Πόλγης Μέγα-Λάκκου (καταβόθρα Κ) με τη Νεροσπηλιά και τη πηγή «Βρύση».

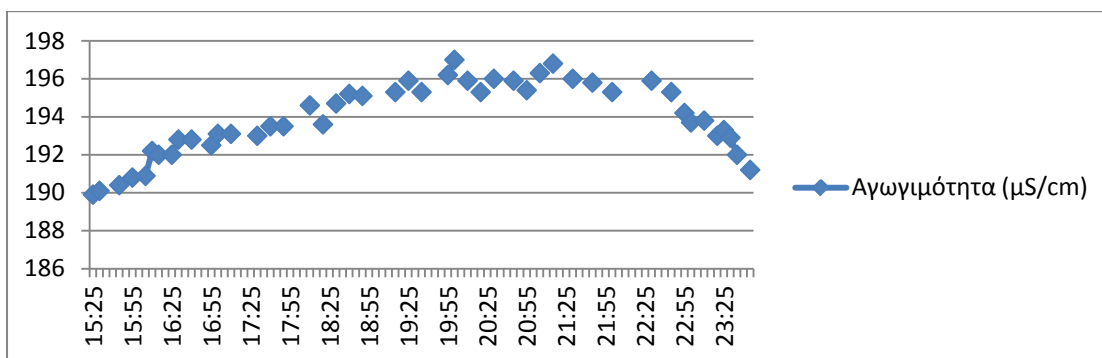


Εικόνα 84: Άποψη της καταβόθρας Κ.

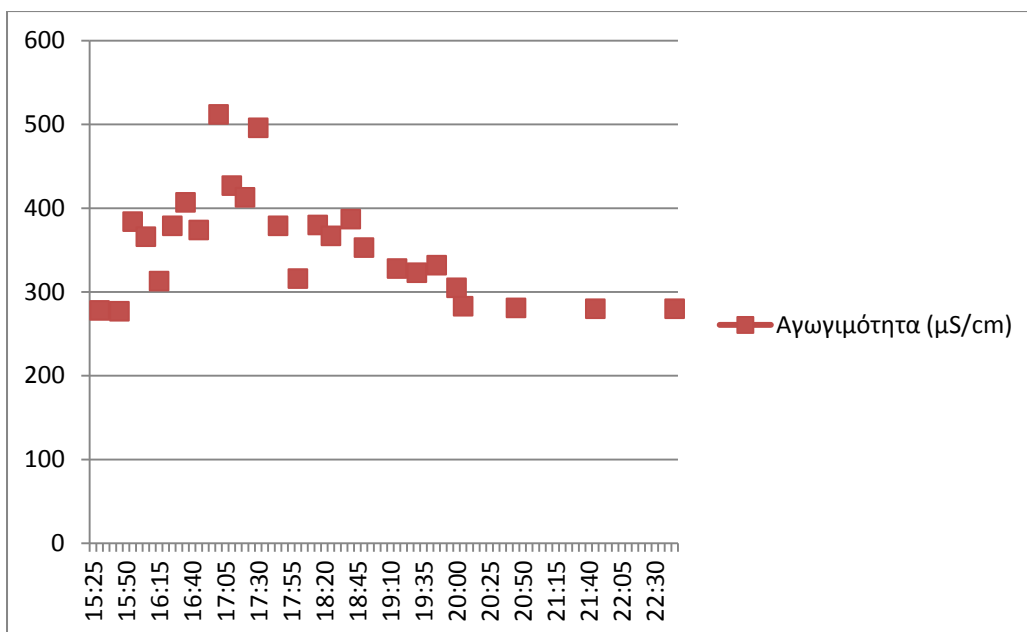


Εικόνα 85: Θέση του ιχνηθέτη (Κ) και σημείων δειγματοληψίας (συνεχόμενη κόκκινη γραμμή βέλους: εμφάνιση του ιχνηθέτη).

Η τοποθέτηση του ιχνηθέτη στην καταβόθρα «Κ», πραγματοποιήθηκε στις 15:30. Εμφανίζεται μετά από 25 περίπου λεπτά (15:55) στην πηγή «Βρύση», όπως και στη Νεροσπηλιά, σύμφωνα με τα διαγράμματα που προέκυψαν με το πέρας του πειράματος (εικόνα 86 & 87).



Εικόνα 86: Διάγραμμα των μετρήσεων ηλεκτρικής αγωγιμότητας στην είσοδο της Νεροσπηλιάς.



Εικόνα 87: Διάγραμμα των μετρήσεων ηλεκτρικής αγωγιμότητας νερού στην πηγή «Βρύση».

Η σύντομη διαδρομή του ιχνηθέτη από την τοποθέτηση του στην καταβόθρα «Κ» μέχρι και την έξοδο του από τις πηγές συμπίπτει και με τα αποτελέσματα των μετρήσεων της Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας (πριν από την έναρξη του πειράματος). Το μέγιστο της συγκέντρωσης εμφανίζεται στις 17:00 στην πηγή «Βρύση», ενώ στη Νεροσπηλιά στις 19:55 περίπου. Αυτό σημαίνει ότι ο ιχνηθέτης ακολουθεί διαφορετικούς διαδρόμους και παρουσιάζει μια υστέρηση 3 ωρών περίπου.

Στις 19:55 επανέρχεται στη φυσική του κατάσταση στην πηγή «Βρύση», ενώ στη Νεροσπηλιά συνεχίζει να εμφανίζεται μέχρι τις 24:00 περίπου για να επανέλθει στην φυσική του κατάσταση. Φαίνεται λοιπόν ότι η διαδρομή που ακολουθεί το νερό και στους δύο καρστικούς αγωγούς είναι σχετικά σύντομη. Χρειάζεται περίπου 25 λεπτά το νερό της πόλγης να διασχίσει τη Νεροσπηλιά και να εμφανιστεί στην είσοδό της, αλλά και στην πηγή «Βρύση». Από τη σύντομη επαναφορά της αγωγιμότητας στα φυσιολογικά δεδομένα στην πηγή «Βρύση» προκύπτει ότι ο καρστικός αγωγός της Νεροσπηλιάς είναι μεγαλύτερης διατομής και με περισσότερες διακλαδώσεις, από τον αγωγό που διοχετεύει νερό από την πόλγη στην πηγή «Βρύση». Έτσι ενώ ο αγωγός της Νεροσπηλιάς διοχετεύει σε 25 λεπτά τον ιχνηθέτη προς την είσοδο και αραιώνεται ομαλά μέχρι τις 24:00, ο αγωγός της πηγής «Βρύσης» πιθανώς λόγω μικρότερης διατομής αραιώνεται ομαλά ταχύτερα.

Το πείραμα αποδεικνύει την άμεση σχέση του νερού κατείσδυσης στην πόλγη του Μέγα-Λάκκου και του νερού που εξέρχεται στις καρστικές πηγές της «Νεροσπηλιάς» και της «Βρύσης».

Επίσης, μέσω του πειράματος της ιχνηθέτησης μπορεί να υπολογιστεί η μέση ταχύτητα του νερού τόσο στην Νεροσπηλιά όσο και στην πηγή «Βρύση» με τη βοήθεια του τύπου:

$$V = \frac{x \text{ (απόσταση)}}{t \text{ (χρόνος)}}$$

Σαν μήκος διαδρομής (x) λαμβάνεται υπόψη η οριζόντια απόσταση μεταξύ του σημείου ιχνηθέτησης (καταβόθρα «Κ») και των σημείων εκροής ($x_{\text{νεροσπηλιάς}} = 1100\text{m}$, $x_{\text{βρύσης}} = 1200\text{m}$), ενώ σαν χρόνος (t) λαμβάνεται ο χρόνος που έκανε ο ιχνηθέτης μέχρι την πρώτη του εμφάνιση. Η ταχύτητα νερού της Νεροσπηλιάς είναι $V_{\text{νεροσπηλιάς}} = 2,64 \text{ Km/h}$, ενώ η ταχύτητα του νερού στη πηγή «Βρύση» είναι $V_{\text{βρύσης}} = 2,88 \text{ Km/h}$.

9. Συμπεράσματα

Η περιοχή μελέτης εκτείνεται από την πόλη του Μέγα-Λάκκου, το σπήλαιο Νεροσπηλιά βορειότερα έως και το φαράγγι της Νεροσπηλιάς. Η εξέλιξη της καρστικής γεωμορφολογίας συνδέεται άμεσα με την τεκτονική ανύψωση που χαρακτηρίζει την περιοχή.

Ο καρστικός υδροφορέας δημιουργείται πιθανώς μετά το Άνω Μειόκαινο και χαρακτηρίζεται από τη φρεατική πλήρωση με νερό των τεκτονικών και στρωματογραφικών συνεχειών. Οι ασυνέχειες αυτές διευρύνονται όσο προχωράει η καρστική διάλυση των ανθρακικών πετρωμάτων δημιουργώντας καρστικούς αγωγούς. Οι αγωγοί αυτοί τοποθετούνται στη φρεατική ζώνη.

Η έντονη τεκτονική και το εφελκυστικό καθεστώς της περιοχής οδηγούν στην έναρξη δημιουργίας τεκτονικών κεράτων και τεκτονικών τάφρων. Η περιοχή του Μέγα-Λάκκου διαμορφώνεται ως τεκτονική τάφος λόγω της παρουσίας δύο μεταπτωτικών ρηγμάτων με αντίθετη διεύθυνσης κλίσης.

Η τεκτονική ανύψωση σε συνδυασμό με τη διεύρυνση των καρστικών αγωγών οδηγεί στη ταπείνωση της πιεζομετρικής επιφάνειας του καρστικού υδροφορέα. Πολλοί φρεατικοί αγωγοί πλέον χαρακτηρίζονται από κατά βάθος διάβρωση, ανάμεσα τους και ο μεγαλύτερος καρστικός αγωγός η Νεροσπηλιά. Η κίνηση του καρστικού νερού πραγματοποιείται στην περιοχή του Μέγα-Λάκκου από Νότο προς Βορρά. Τα σημεία εισόδου του επιφανειακού νερού (καταβόθρες) προς το υπόγειο καρστ διευρύνονται αρκετά. Ειδικά, οι μεγάλες καταβόθρες του χαμηλότερου υψομετρικά σημείου της πόλης του Μέγα-Λάκκου τροφοδοτούν άμεσα το καρστικό αγωγό της Νεροσπηλιάς. Συγχρόνως, τροφοδοτούν και επιμέρους καρστικούς αγωγούς είτε προς τα Βορειοδυτικά (πηγή «Βρύση») είτε προς τα Βορειοανατολικά.

Ένα νεότερο κανονικό ρήγμα παράταξης ΒΔ-ΝΑ αποτελεί το γενεσιουργό αίτιο του τεκτονικού πρηνούς στην περιοχή εισόδου της Νεροσπηλιάς (εικόνα 35, σελ.55) και κυρίως της αποκάλυψης αυτού του μεγάλου καρστικού αγωγού. Στο τεκτονικό πρηνές που έχει δημιουργηθεί αποτίθεται τραβερτινικό υλικό με πιθανή Πλειστοκαινική ηλικία. Στη μάζα του τραβερτίνη δημιουργείται πληθώρα πρωτογενών σπηλαίων. Στα κατάντι της εισόδου της Νεροσπηλιάς δημιουργείται καταρράκτης από ένα συζυγές κανονικό ρήγμα.

Η τεκτονική ανύψωση οδηγεί στη δημιουργία έντονης κατά βάθος διάβρωσης σε ασβεστολιθικές περιοχές. Το πλέον αντιπροσωπευτικό παράδειγμα κατά βάθος διάβρωσης αποτελεί το φαράγγι της Νεροσπηλιάς και του Τσιγγενορρέματος.

Τα υδροχημικά αποτελέσματα δείχνουν ότι οι καρστικοί αγωγοί έχουν διευρυνθεί αρκετά ώστε το υπόγειο νερό να διανύει ταχέως το υπόγειο καρστικό σύστημα. Το νερό που κατεισδύει στην πόλη του Μέγα-Λάκκου οδηγείται κυρίως στο μεγάλο καρστικό αγωγό της Νεροσπηλιάς και σε μικρότερους αγωγούς, όπως αυτός που καταλήγει στην πηγή «Βρύση» (η γενική διεύθυνση του υπόγειου νερού είναι προς Βορρά, ΒΑ και ΒΔ). Το νερό στη συνέχεια συγκεντρώνεται κατάντι της Νεροσπηλιάς διέρχεται το φαράγγι και καταλήγει στο Τσιγγενορρέμα.

Από τη μελέτη των παροχών νερού προκύπτει ότι το μεγαλύτερο ποσοστό του νερού από το βάθος της Νεροσπηλιάς διοχετεύεται κυρίως στο νεότερο γενετικά Ανατολικό κλάδο. Τα σημάδια της κατά βάθος διάβρωσης είναι έντονα στους αγωγούς της Νεροσπηλιάς και κυρίως στο βόρειο τμήμα του Κεντρικού Κλάδου και της Τμήματος Εισόδου.

Η εξέλιξη της καρστικής διάβρωσης θα οδηγήσει στην εκκένωση από νερό της Νεροσπηλιάς. Σε αυτό το στάδιο το σπήλαιο θα χαρακτηρίζεται από καταρρευσιγενή μορφολογία μέχρι την αποκάλυψη του από την επιφανειακή διάβρωση.

10. Βιβλιογραφία

- Βαξεβανόπουλος, Μ., 2003: *Πετράλωνα Χαλκιδικής, Καρστικές μορφές της ευρύτερης περιοχής με έμφαση στο σπήλαιο των Νυχτερίδων*. Διπλωματική Εργασία, τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.
- Βαξεβανόπουλος, Μ., 2007: *Τεκτονικές συνθήκες σπηλαιογένεσης στο σπήλαιο «Μελισσότρυπα» Κεφαλοβρύσου Ελασσόνας*. Διατριβή Ειδίκευσης. Τμήμα Γεωλογίας. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, σελ. 1-106, Θεσσαλονίκη.
- Barth M. B., Mason, P., Davie, G., Drury, M., 2008: *The Othris Ophiolite, Greece: A snapshot of subduction initiation at a mid-ocean ridge*. Lithos 100 (2008) 234–254.
- Βουδούρης, Κ., 2009: *Υδρογεωλογία Περιβάλλοντος*. Εκδόσεις Τζιόλα. Θεσσαλονίκη, σελ.460.
- Bogli, A., 1960: *Kalklosung und karrenbildung. Zeitschrift fur Geomorphologie. Supplementband 2: 4 – 21.*
- Bosak, P., 2003: *Karst processes from the beginning to the end: How can they be dated?* Speleogenesis and evolution of Karst Aquifers 1 (3), Virtual Scientific Journal, www.speleogenesis.info, p.7.
- Γαλανάκης, Δ., 1997: *Νεοτεκτονική δομή και στρωματογραφία των νεογενών – τεταρτογενών ιζημάτων της λεκάνης του Αλμυρού – Παγασητικού, Πηλίου, Διαλου Ωρέων – Τρικεριού και Μαλιακού*. Διαδακτορική Διατριβή Τμήματος Γεωλογίας Α.Π.Θ.
- Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού, τοπογραφικοί χάρτες. κλίμακας 1:50000. (Φύλλα χάρτη: Αμυρού, Πελασγία, Ανάβρα και Στυλίδα).
- Γκολούκοβιτς – Δεληγιάννη Μ., 2011: *Καρστική γεωμορφολογική εξέλιξη στην Δυτική Ελλάδα: Η περίπτωση της περιοχής του Ξηρόμερου*. Διδακτορική Διατριβή Τμήματος Γεωγραφίας Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο. Αθήνα 2011.
- Chernyshev, N., 1983: *Fissures in rock*, Nauka, 240p, Moscow.
- Cucchi, F., 2009: In: *Karst rock features karren sculpturing*. Littera picta d.o.o., Ljubljana.
- Deybrodt, W. & Gabrovsek., F., 2000: *Dynamics of the evolution of single karst conduits*. In: Klimchouk, A., B., Ford, D., C., Palmer, A., N., Deybrodt, W., Eds. *Speleogenesis: Evolution of karst aquifers*. National Speleological Society. Huntsville, Alabama, 184-193.
- Dotsika E., Maniatis Y., Tzavisopoulos E., Poutoukis D., Albanakis K., 2004: *Hydrogeochemical condition of the Pikrolimni lake (Kilkis Greece)*. Proceedings of the 10th International Congress. Geological Society of Greece. Thessaloniki.
- Derryhouse, A., R., 1907: *Limestone caverns and potholes and their mode of origin*. Yorkshire Ramblers Club Journal 2(7), 223-8.
- Ford, D., C., & Williams, P., W., 1989: *Karst geomorphology and hydrology*. Unwin Hyman, 600p., London.
- Ford, D., C., 2003: *Perspectives in karst hydrogeology and cavern genesis*. Speleogenesis and evolution of Karst Aquifers 1(1), Virtual Scientific Journal, www.speleogenesis.info, January, p.2.
- Ford, T.D. and Pedley, H.M., 1996: *A review of tufa and travertine deposits of the world*. Earth – Science Reviews 41 117 – 175.

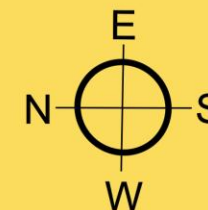
- Ford, D., C., & Williams, P., W., 2007: *Karst Hydrology and Geomorphology*. Willey, Chichester, 576p.
- Gines A., Knez M., Slabe T., Dreybrodt W., 2009: *Karst rock features karren sculpturing*. Littera picta d.o.o., Ljubljana.
- Gams, I., 1973: *Slovenska Kraska terminologija* (Slovene Karst Terminology), Zveza Geografskih Institucij Jugoslavije Ljubljana.
- Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Ι.Γ.Μ.Ε.), Γεωλογικοί Χάρτες, κλίμακας: 1:50000. (Φύλλα χάρτη: Αλμυρού, Ανάβρα, Μύλοι και Στυλίδας).
- Κακλής, Τ., 2011: *Υδρογεωλογική μελέτη διαχείρισης υδάτινων πόρων Πιερίας λεκάνης Ν. Καβάλας*. Διδακτορική Διατριβή. Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Καλλέργης, Γ., 2000: *Εφαρμοσμένη Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία*. 2^η έκδοση, τόμος Β, Τ.Ε.Ε. Αθήνα.
- Klimchouk, A., B., & Ford, D., C., 2000: *Lithologic and structural controls of dissolutional cave development*. In: Klimchouk, A., B., Ford, D., C., Palmer, A., N., Deybrodt, W., Eds. *Speleogenesis. Evolution of karst aquifers*. National Speleological Society. Huntsville, Alabama, 54-64.
- Klimchouk, A., B., Ford, D., C., Palmer, A., N., Deybrodt, W., 2000: *Speleogenesis. Evolution of karst aquifers*. National Speleological Society. Huntsville, Alabama.
- Kranjic, A., 2001: *About the name Kras (Karst) in Slovenia*. Proceedings of the 13th International Congress of Speleology, Brazilia Vol. 2 140-2.
- Lauritzen, s., & Lundberg, j. (2000): *Solutional and erosional morphology*. In: Klimchouk, A., B., Ford, D., C., Palmer, A., N., Deybrodt, W., Eds. *Speleogenesis. Evolution of karst aquifers*. National Speleological Society. Huntsville, Alabama, 408-426.
- Μουντράκης, Δ., 1985: *Γεωλογία της Ελλάδας*. University studio press, Θεσσαλονίκη.
- Nikod, J., 1976: *Corrosion de type crypto-karstique dauw les karst mediterranneus*. In: *Karst Processes and Relevant Landforms*. Departement of Geography, Psilosophical Falculty, Ljubljana, 171-179.
- Palmer, N., A., 2000: *Hydrogeologic control of cave patterns*. In: KLIMCHOUK, A., B., Ford, D., C., Palmer, A., N., Deybrodt, W., Eds *Speleogenesis. Evolution of karst aquifers*. National Speleological Society. Huntsville, Alabama, 77-90.
- Palmer, N., A., 2003: *Speleogenesis in carbonate rocks*. *Speleogenesis and evolution of Karst Aquifers*, Virtual Scientific Journal, www.speleogenesis.info, p.1-11.
- Σταμάτης Γ. & Ζαγγανά Ε., 2004: *Εφαρμογή ιχνηθετών Και υδροχημικών μεθόδων στην έρευνα του καρστικού συστήματος της Β. Όσσας/ ΒΑ Θεσσαλία*. Πρακτικά 10^ο Διεθνές Συνέδριο Ελληνική Γεωλογικής Εταιρίας.
- Σούλιος, Χ., Γ., 2006: *Γενική Υδρογεωλογία* Τόμος Δ, University Studio Press. Θεσσαλονίκη.

Ηλεκτρονική Βιβλιογραφία

- www.speleogenesis.com
- <http://vtopo.free.fr/>

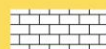
11. Παράρτημα

Είσοδος



**Σπήλαιο «Νεροσπηλιά»
του όρους Όθρυς
Αυγούστος 2012**

Υπόμνημα

-  Κροκαλοπαγές
-  Ασβεστόλιθος
-  Λατυποπαγής και Κροκαλοπαγής
Ασβεστόλιθος
-  Λατυποπαγής Ασβεστόλιθος
-  Ψαμμίτης
-  Ασβεστόλιθος με αργλικές
ενστρώσεις
-  Μαύρος Ασβεστόλιθος
-  Κανονικό Ρήγμα
-  Πεσμένα Τεμάχη
-  Κλίσεις
-  Λίμνη
-  Πιθανή συνέχεια

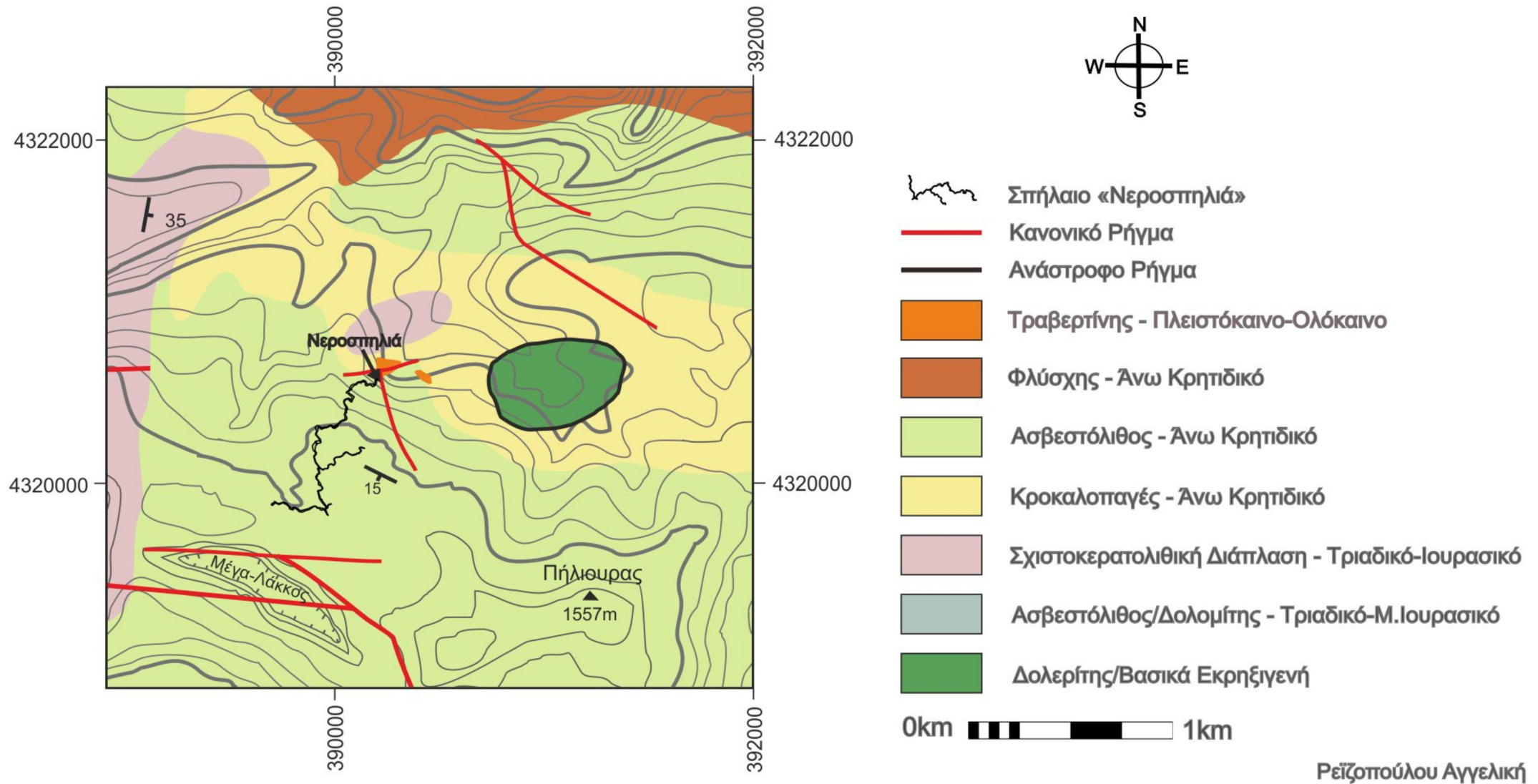
02/19/2015

Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

0  100 m

Ρεϊζοπούλου Αγγελική

Γεωλογικός Χάρτης Περιοχής «Μέγα-Λάκκου, Νεροσπηλιάς»



Ρεϊζοπούλου Αγγελική

