Ημερίδα: «Η συμβολή της Τεχνικής Γεωλογίας στην πρόληψη και αντιμετώπιση Γεωκινδύνων. Σύγχρονες τεχνικές έρευνας και έγκαιρης προειδοποίησης, περιστατικά και νομικό πλαίσιο»

Αναγνώριση, διερεύνηση και αξιοποίηση θαμμένων κοιτών ποταμών για τη σταθεροποίηση μεγάλων κατολισθήσεων. Παραδείγματα από τη σταθεροποίηση δύο κατολισθήσεων στη βορειοδυτική Ελλάδα.

Μ. Μπαρδάνης
Δρ Πολιτικός Μηχανικός
ΕΔΑΦΟΣ Σύμβουλοι Μηχανικοί Α.Ε.

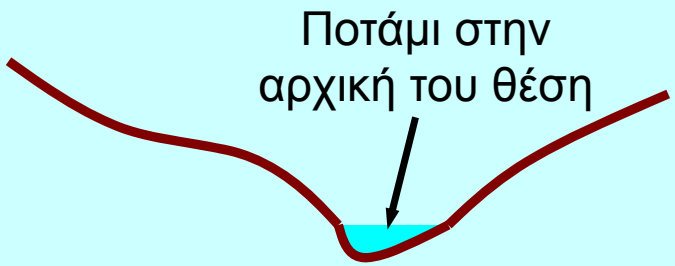
Αθήνα, 28 Μαρτίου 2019

Το πρόβλημα:

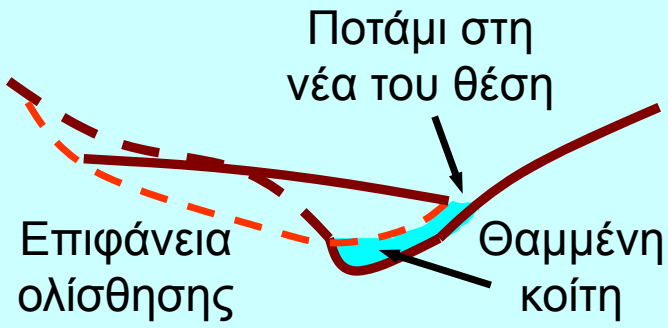
Πολύ συχνά, μεγάλου μεγέθους παλαιοκατολισθήσεις με βασικό αίτιο εκδήλωσής τους την διάβρωση του ποδός τους, παρουσιάζουν αργές και μικρές μετακινήσεις, οι οποίες συμβαίνουν για τόσο μεγάλο χρονικό διάστημα που οδηγούν στην κάλυψη της κοίτης των ποταμών που τις προκάλεσαν με τη διάβρωση του ποδός τους.

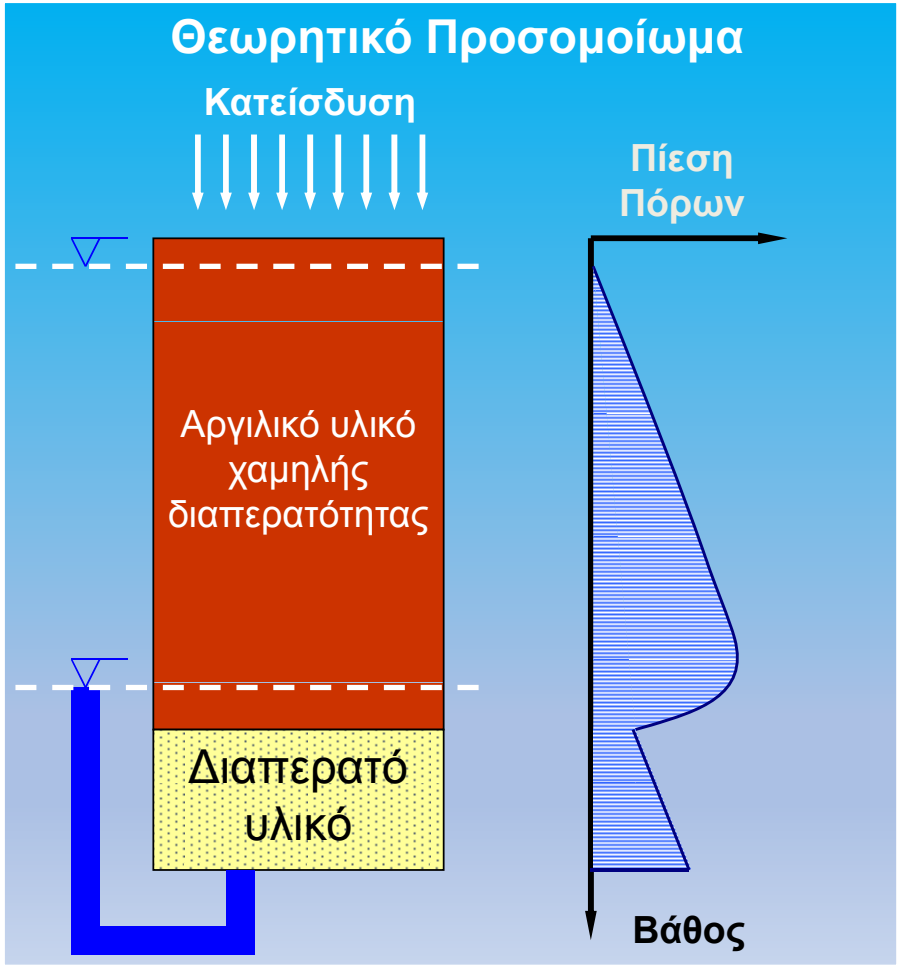
Αυτό το φαινόμενο δημιουργεί ένα ιδιόμορφο καθεστώς πιέσεων πόρων στο τμήμα της κατολισθαίνουσας μάζας που υπέρκειται της θαμμένης κοίτης.

Κατάσταση πριν την εκδήλωση της κατολίσθησης



Κατάσταση μετά την εκδήλωση της κατολίσθησης





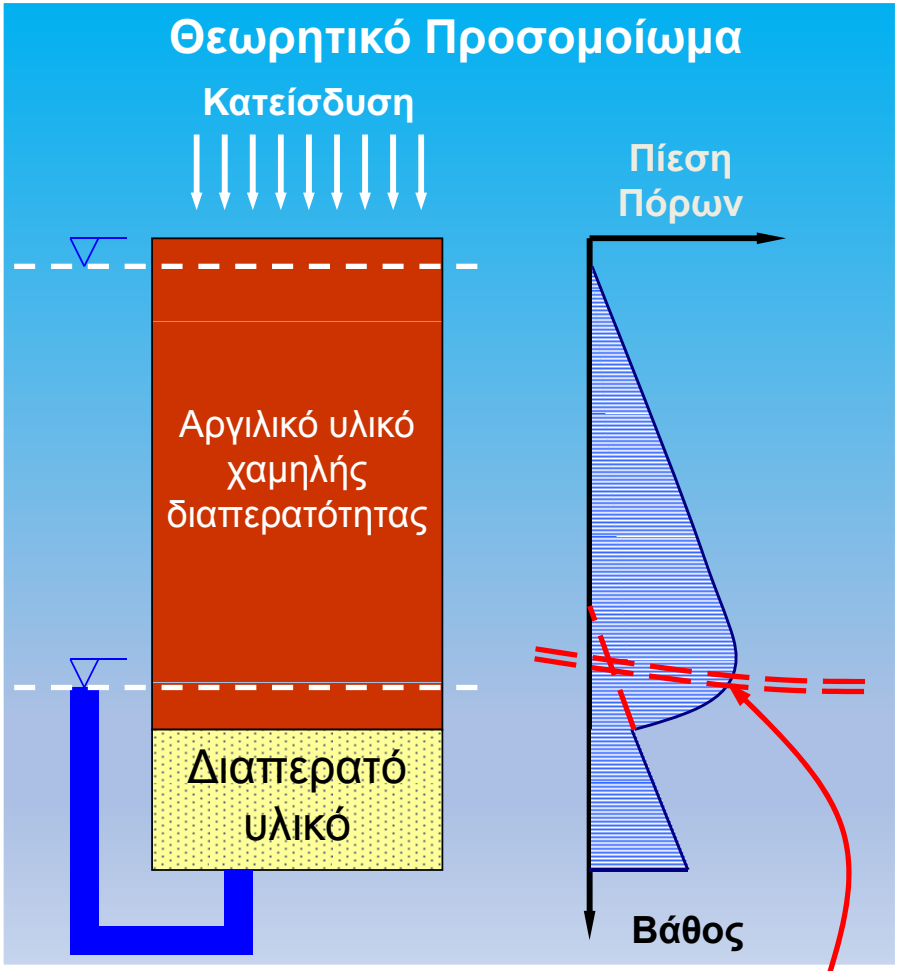
Υλικά κατολίσθησης χαμηλής διαπερατότητας με υποστράγγιση στο κάτω όριό τους

Επιμέρους προβλήματα:

- *Αναγνώριση*: Το μείζον γεωλογικό φαινόμενο και ο αντίστοιχος μηχανισμός κατολίσθησης/δημιουργίας της στρωματογραφίας στον πόδα πρέπει να αναγνωριστεί έγκαιρα από τη γεωλογική μελέτη
- *Διερεύνηση/Τεκμηρίωση*: Το πρόγραμμα της γεωτεχνικής έρευνας πρέπει να σχεδιαστεί κατάλληλα με διάνοιξη γεωτρήσεων σε κρίσιμες θέσεις, εκτέλεση των κατάλληλων δοκιμών πεδίου και εργαστηρίου και εγκατάσταση του κατάλληλου δικτύου πιεζομέτρων

Επιμέρους προβλήματα:

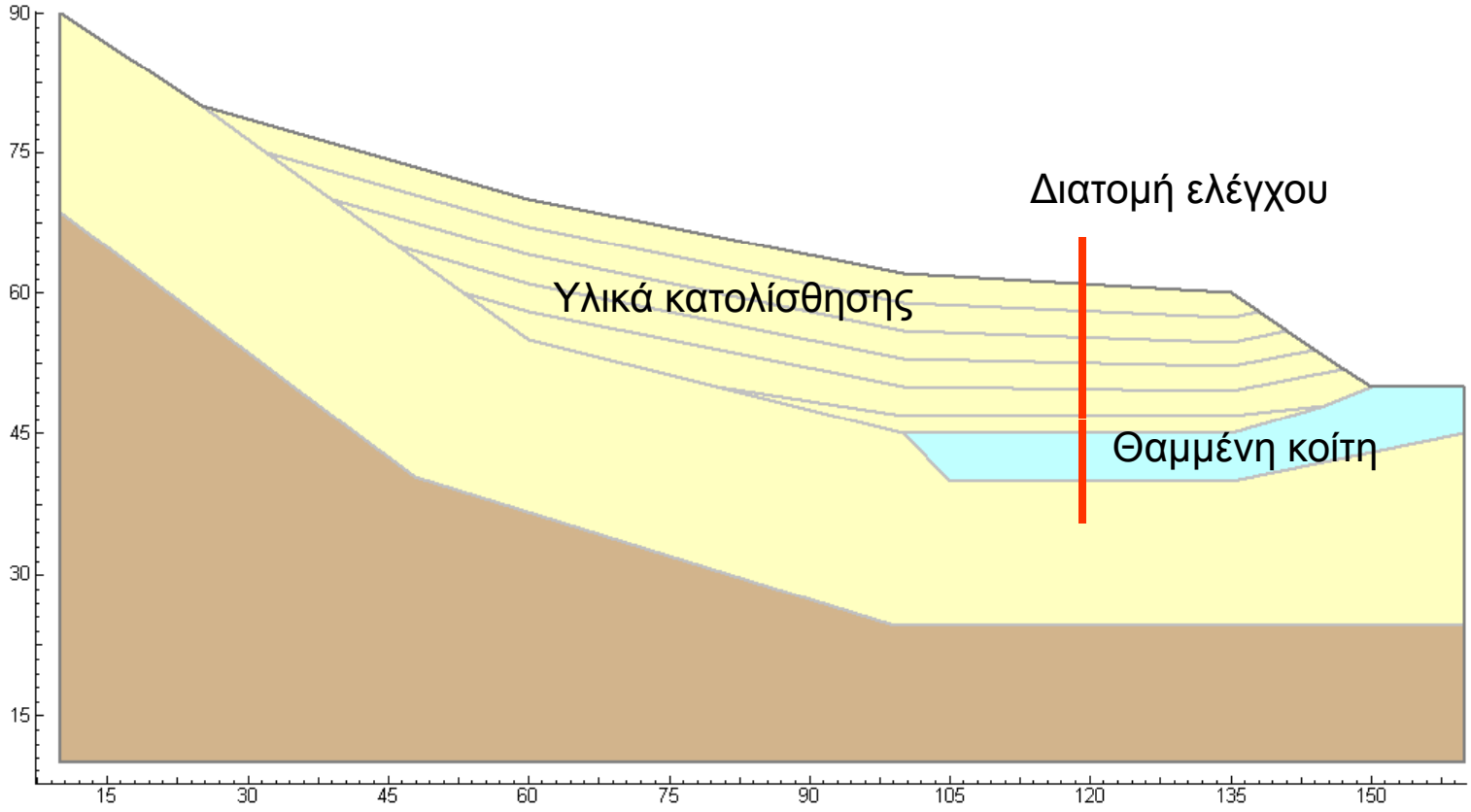
- *Αξιοποίηση*: Αναγνώριση ευκαιρίας (!), κατάλληλες προσομοιώσεις αρχικού καθεστώτος υπογείων υδάτων, κατάλληλες προσομοιώσεις εξέλιξης της πίεσης πόρων, σχεδιασμός συστήματος βαθειών αποστραγγιστικών μέτρων, επιβεβαίωση της επιρροής του συστήματος



Σε αυτή την περιοχή βρίσκεται η επιφάνεια ολίσθησης. Το όφελος βρίσκεται στο να μειωθεί η πίεση πόρων εκεί!

Γιατί στα υλικά κατολίσθησης χαμηλής διαπερατότητας αναπτύσσεται στην περιοχή του ποδός αυτή η μη γραμμική κατανομή πίεσης πόρων;

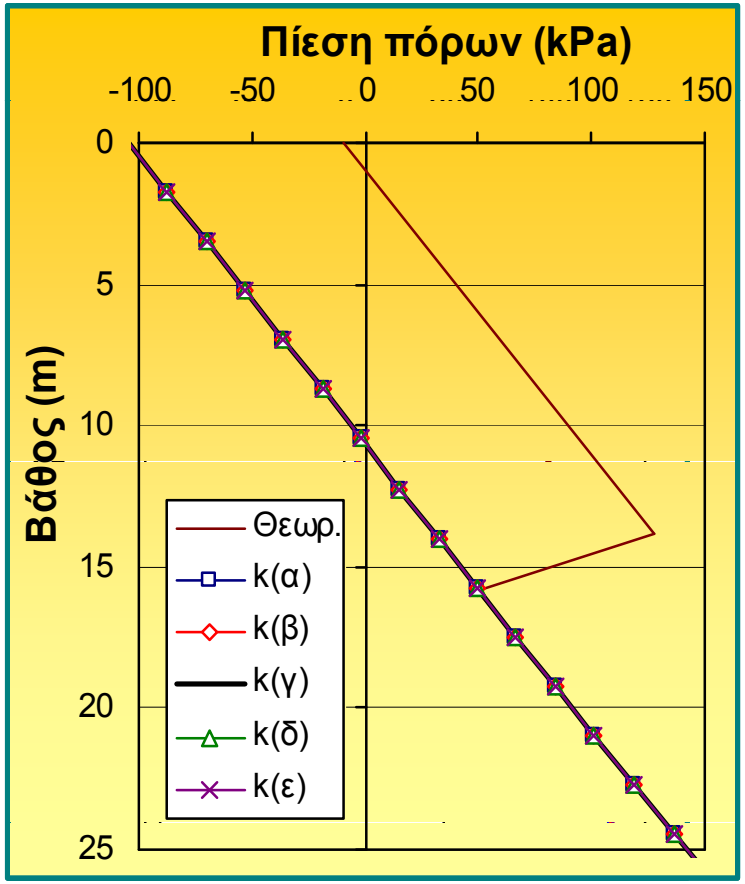
1. Ας δούμε τα αποτελέσματα της αριθμητικής διερεύνησης σε ένα θεωρητικό παράδειγμα

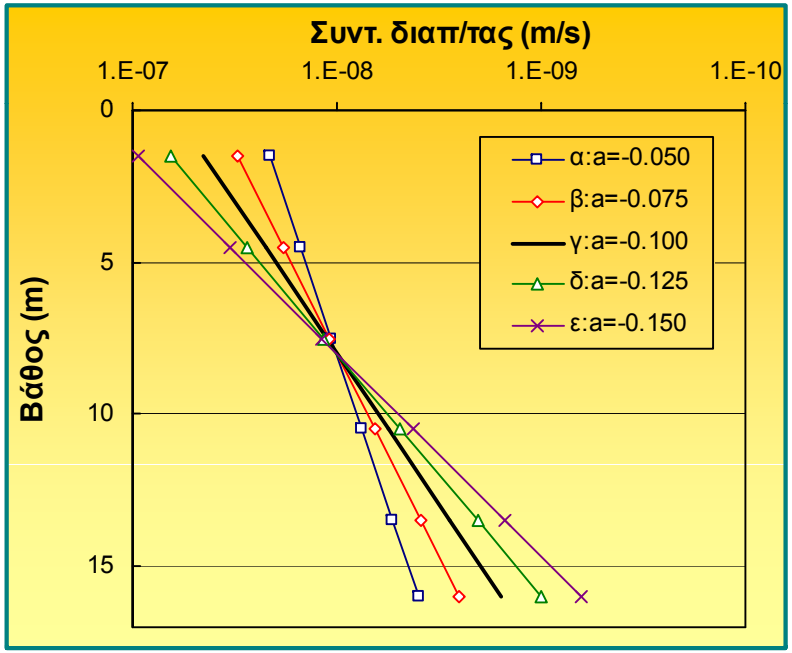


ΕΔΑΦΟΣ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Α.Ε.

Αριθμητικές διερευνήσεις-Συντελεστής Διαπερατότητας

2. Ομοιογενής/Ανομοιογενής συντελεστής διαπερατότητας



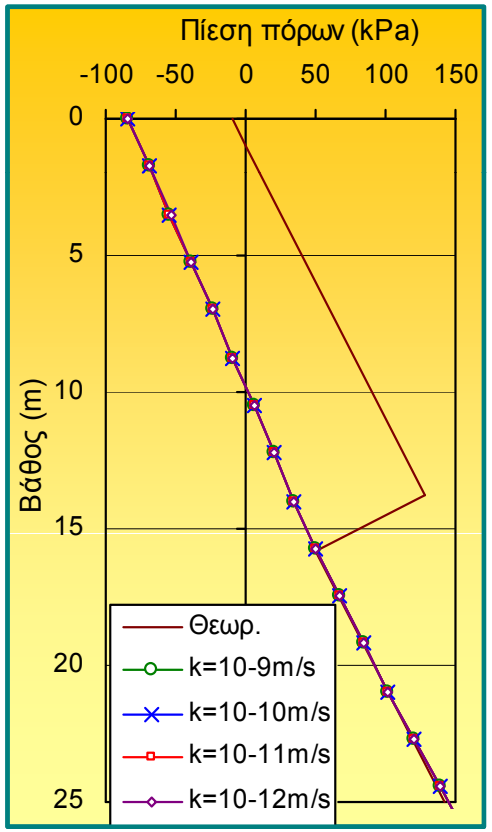


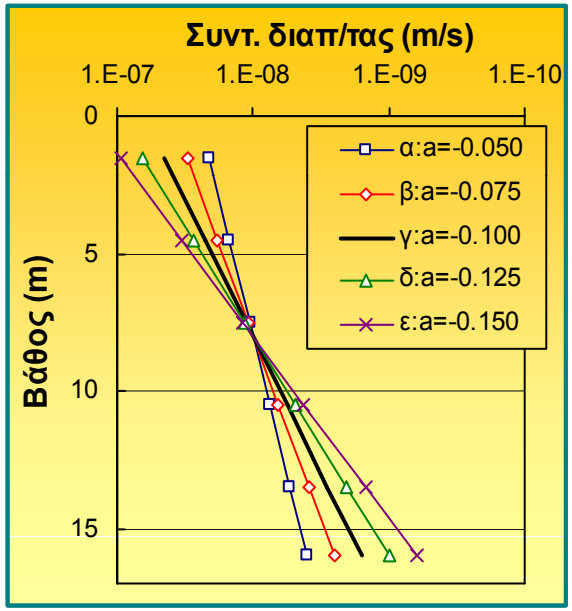
$k = a \times \log \sigma_v'$

Προσοχή: *Ακόμη και όταν εισήχθη ανομοιογένεια του συντελεστή διαπερατότητας με το βάθος, δεν κατέστη δυνατό να προβλεφθεί η μη γραμμική κατανομή της πίεσης πόρων*

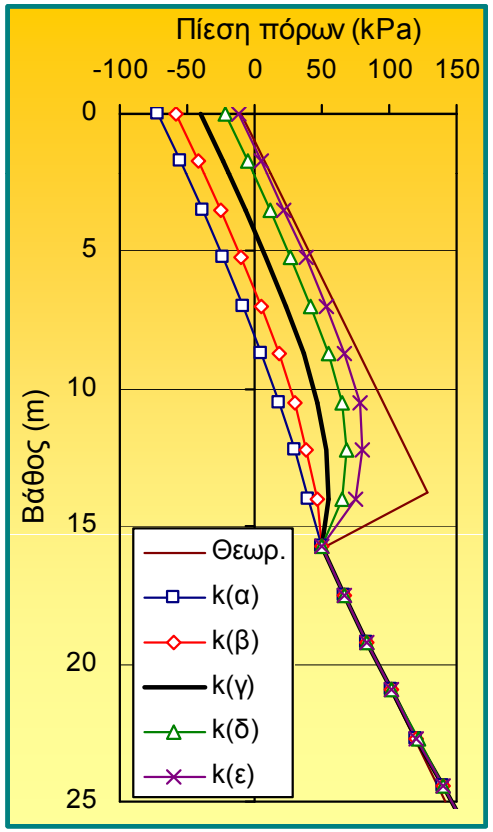
Αριθμητικές διερευνήσεις-Κατείσδυση

3. Ομοιογενής/Ανομοιογενής συντελεστής διαπερατότητας με κατείσδυση από την επιφάνεια





$$k = a \times \log \sigma_v'$$



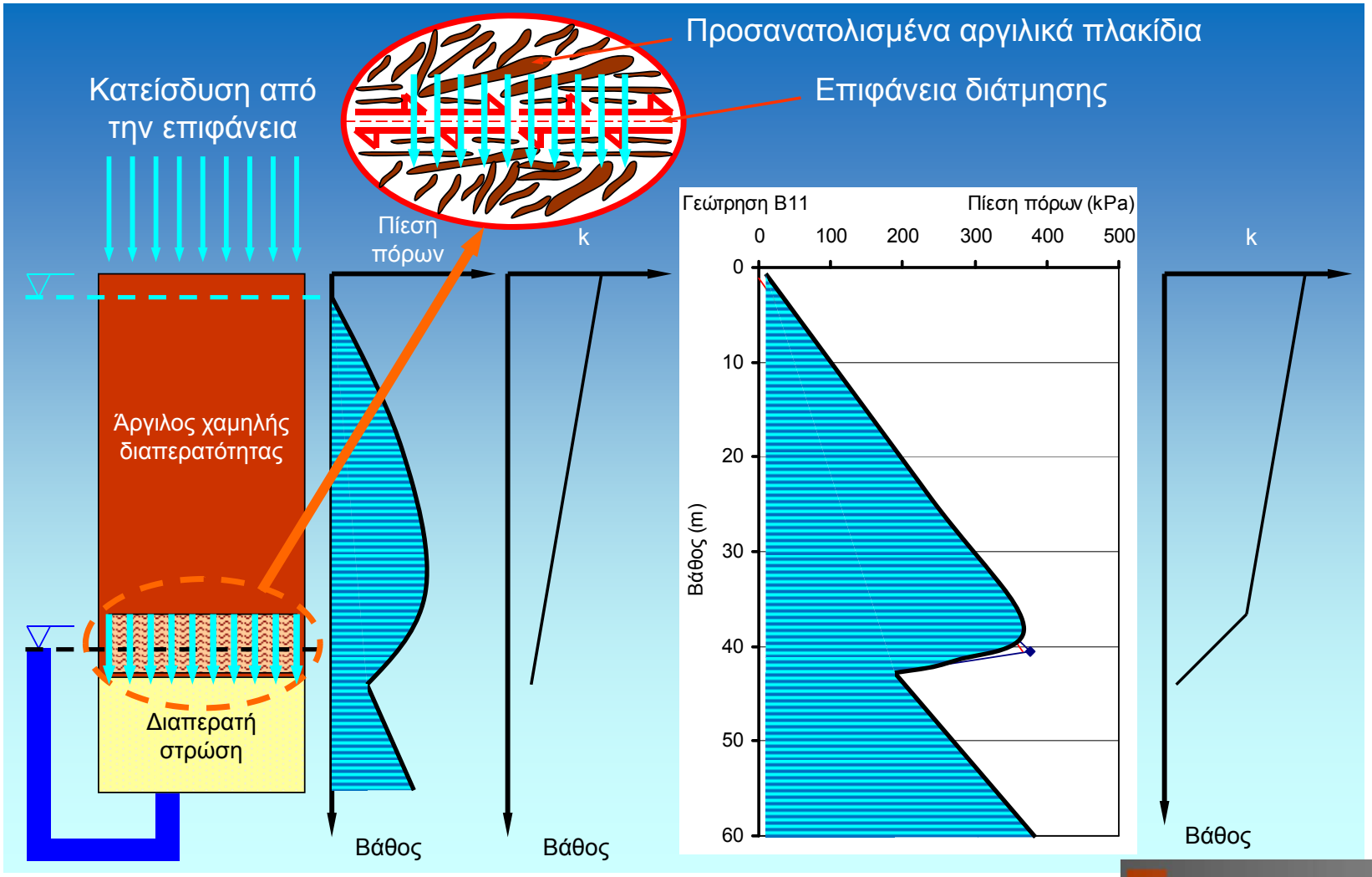
Προσοχή: *Για να προβλεφθεί η μη γραμμική κατανομή της πίεσης πόρων χρειάζεται να εισαχθεί μείωση του συντελεστή διαπερατότητας με το βάθος και ΚΑΤΕΙΣΔΥΣΗ από την επιφάνεια.*

Με ποια τιμή της κατείσδυσης ξεκινά η προσομοίωση; Μία καλή πρώτη προσέγγιση είναι περίπου το μισό της ετήσιας βροχόπτωσης ανηγμένο σε m/s.

Για να γίνει η προσομοίωση, πρέπει η τιμή της κατείσδυσης που ορίζεται ως οριακή συνθήκη στην επιφάνεια να είναι μικρότερη της τιμής του συντελεστή διαπερατότητας στην επιφανειακή στρώση του εδάφους!

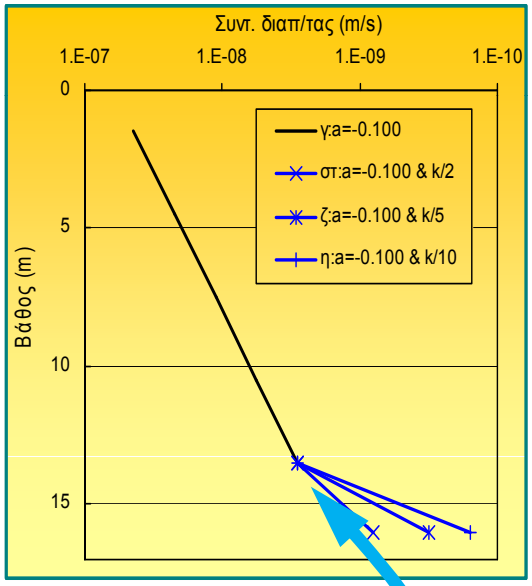
Αριθμητικές διερευνήσεις-Κατείσδυση

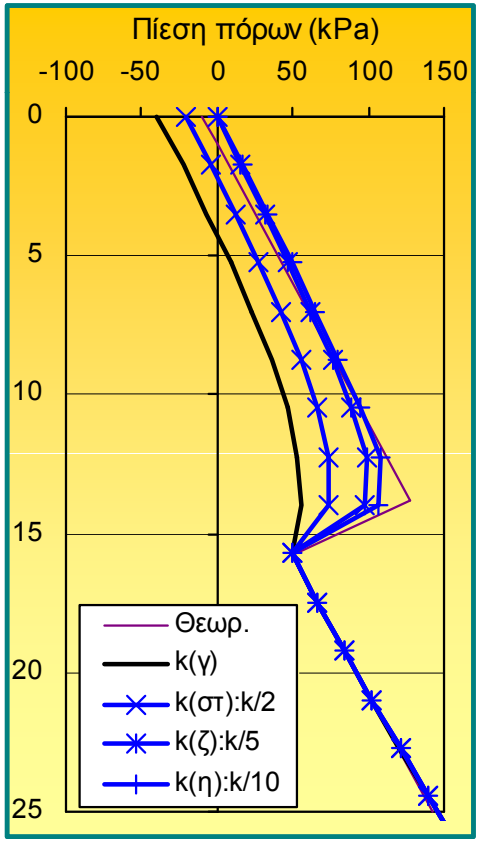
Ανισοτροπία στην επιφάνεια ολίσθησης

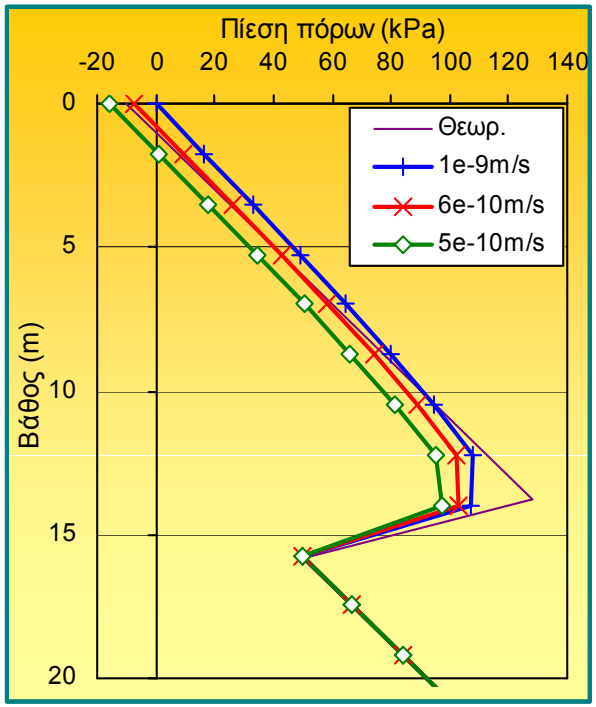


Αριθμητικές διερευνήσεις-Ανισοτροπία συντελεστή διαπερατότητας

4. Ανομοιογενής συντελεστής διαπερατότητας με κατείσδυση από την επιφάνεια και ανισοτροπία στην επιφάνεια ολίσθησης



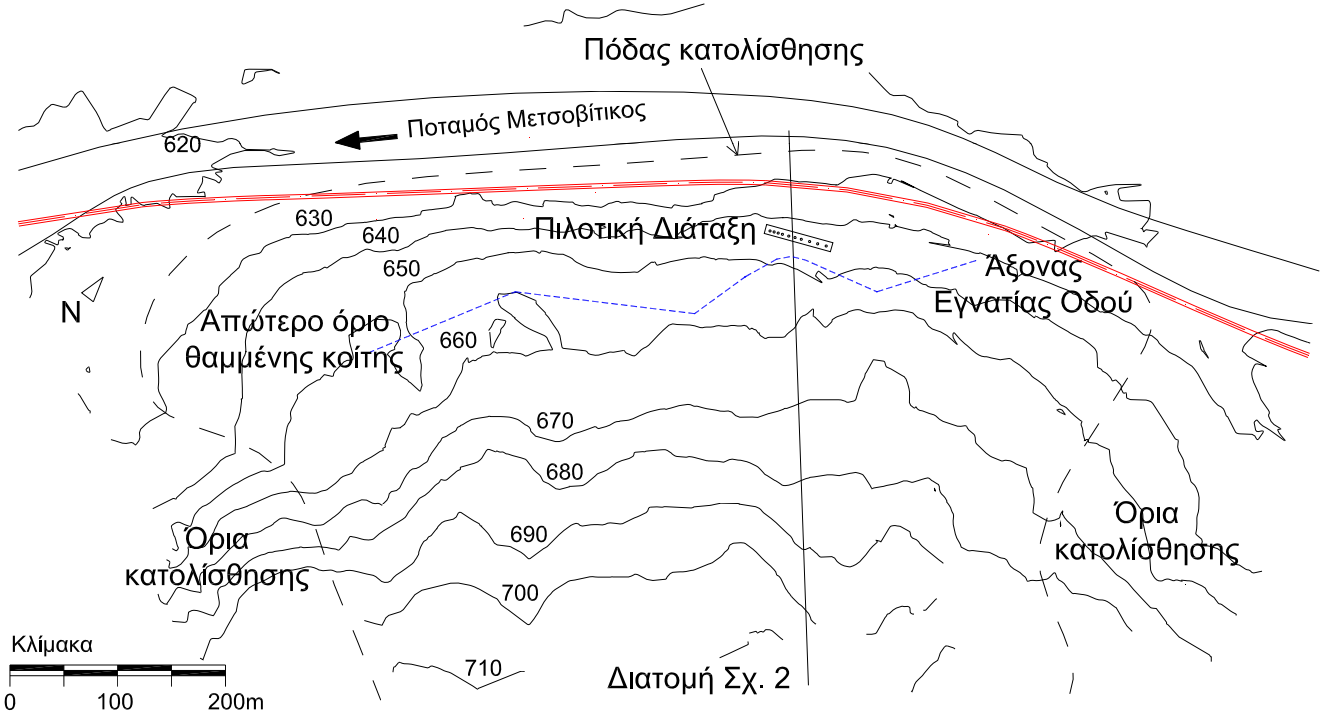




Προσοχή: *Για να γίνει πιο οξεία η μεταβολή της μη γραμμικής κατανομής από το ανώτερο ευθύγραμμο τμήμα προς την κατώτερη πιεζομετρία, πρέπει να εισαχθή κάποια επιπλέον μείωση του συντελεστή διαπερατότητας σε εκείνο το βάθος*

ΕΔΑΦΟΣ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Α.Ε.

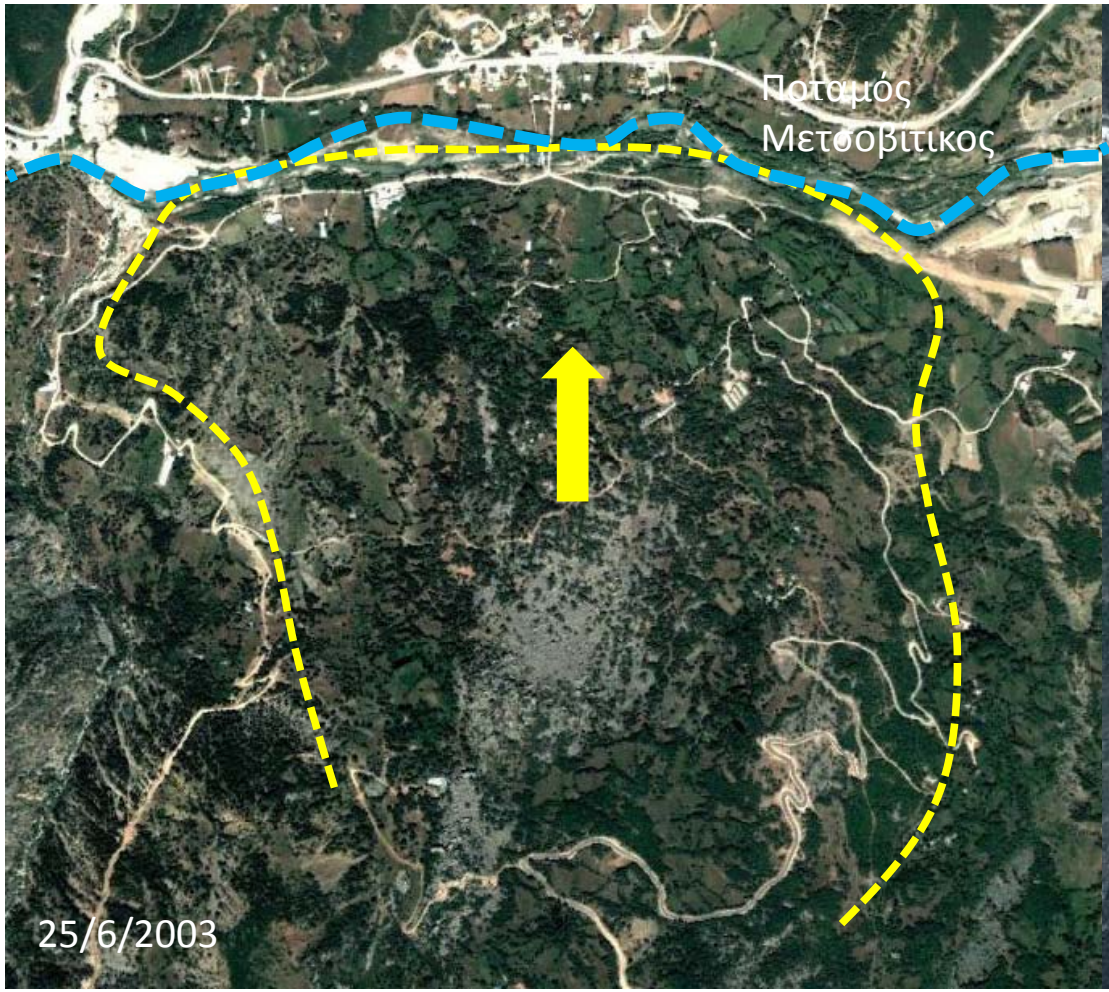
Τμήμα 3.1 της Εγνατίας Οδού (Μ. Περιστέρι – Ανθοχώρι)
Κατολίσθηση Περιοχής Β (Χ.Θ. 1+100 έως Χ.Θ. 1+900)

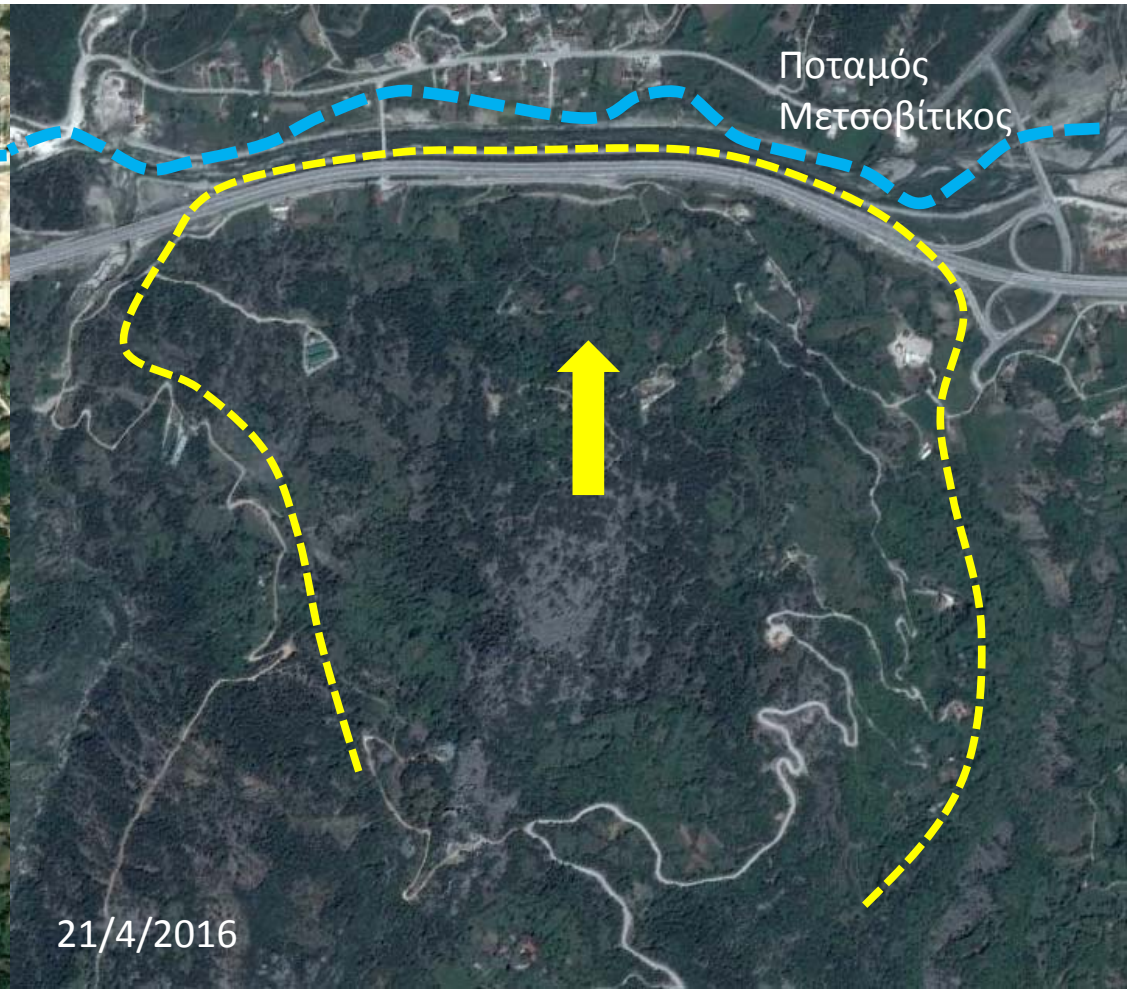


- Πρόκειται για κατολίσθηση πλάτους περίπου 800m, μήκους περίπου 2000m και μέγιστου βάθους μετακινήσεων περίπου 30-35m
- Στον πόδα της υπάρχει θαμμένη παλαιά κοίτη του Ποταμού Μετσοβίτικου που καλύφθηκε από την κατολίσθηση

Τμήμα 3.1 της Εγνατίας Οδού (Μ. Περιστέρι – Ανθοχώρι)

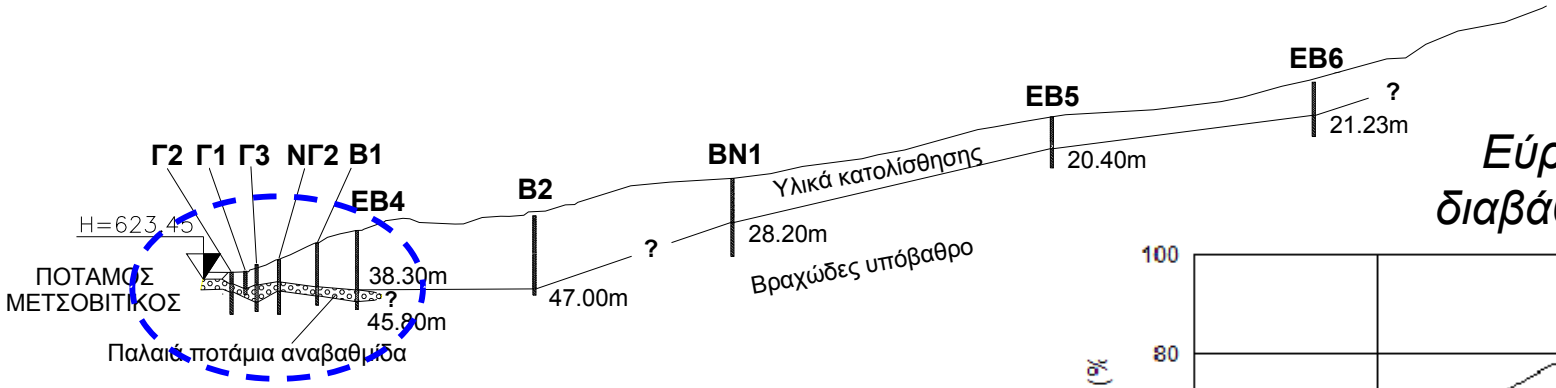
Κατολίσθηση Περιοχής Β (Χ.Θ. 1+100 έως Χ.Θ. 1+900)



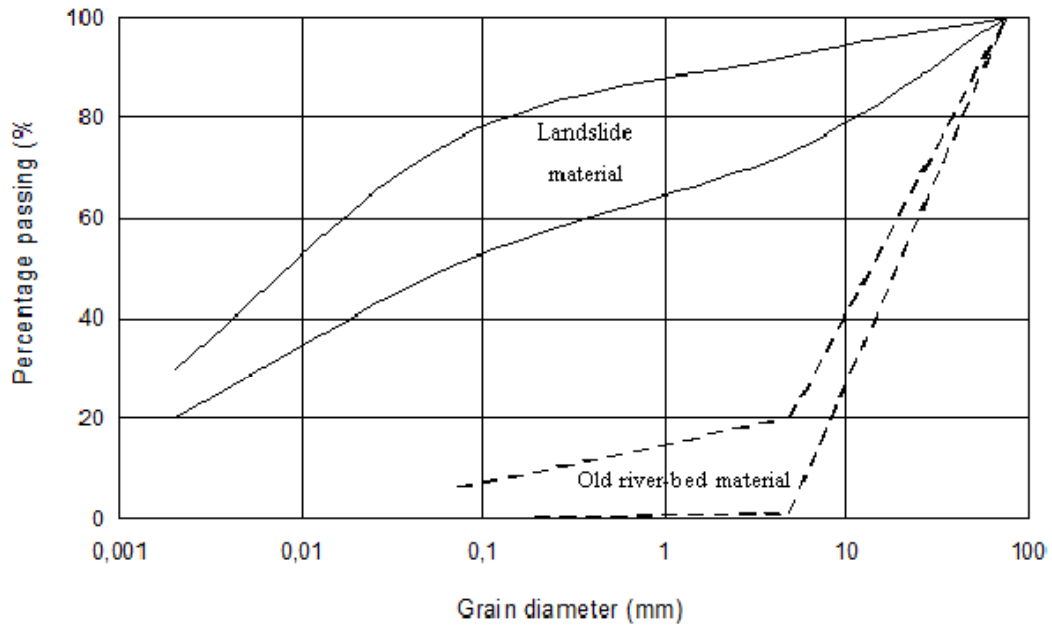


Τμήμα 3.1 της Εγνατίας Οδού (Μ. Περιστέρι – Ανθοχώρι)

Διατομή της κατολίσθησης της Περιοχής Β



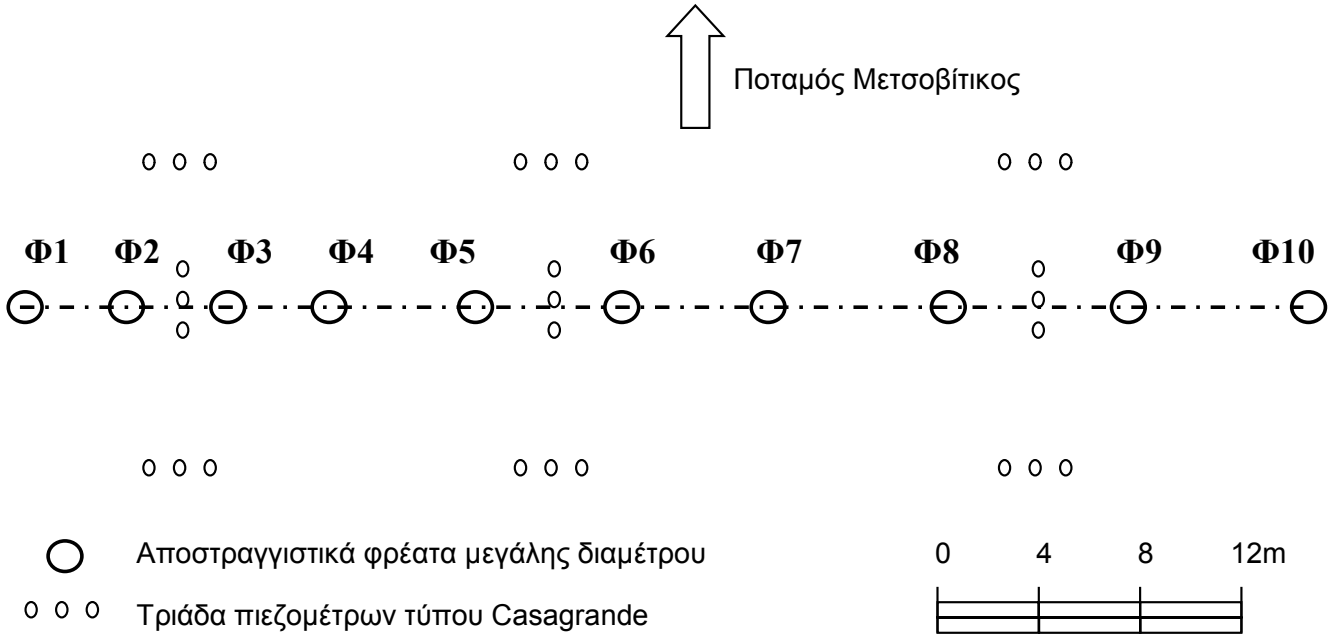
Εύρος καμπυλών κοκκομετρικής διαβάθμισης απαντώμενων υλικών



Στην κατάντη περιοχή, τα υλικά κατολίσθησης υπέρκεινται ποτάμιας αναβαθμίδας αποτελούμενης από διαπερατά υλικά

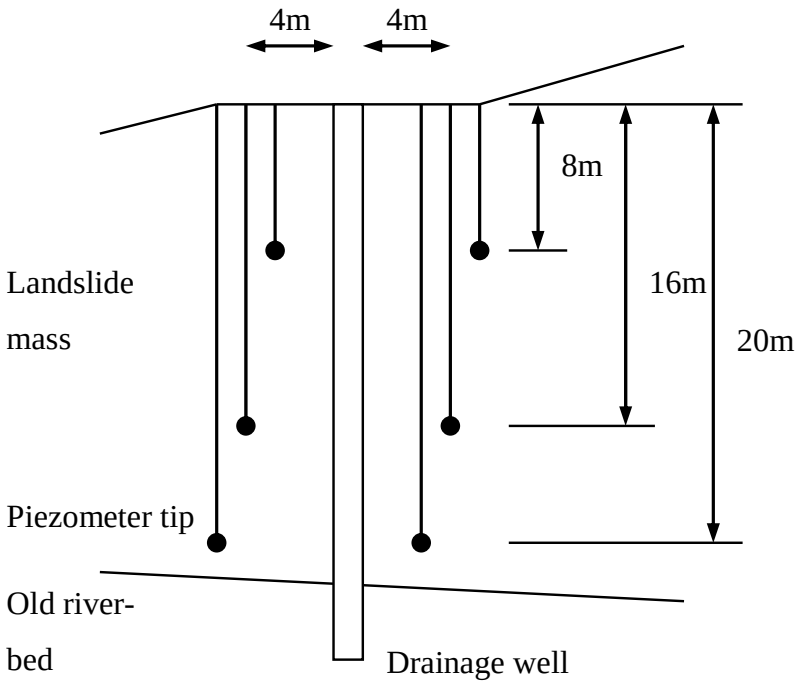
ΕΔΑΦΟΣ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Α.Ε.

Τμήμα 3.1 της Εγνατίας Οδού (Μ. Περιστέρι – Ανθοχώρι)



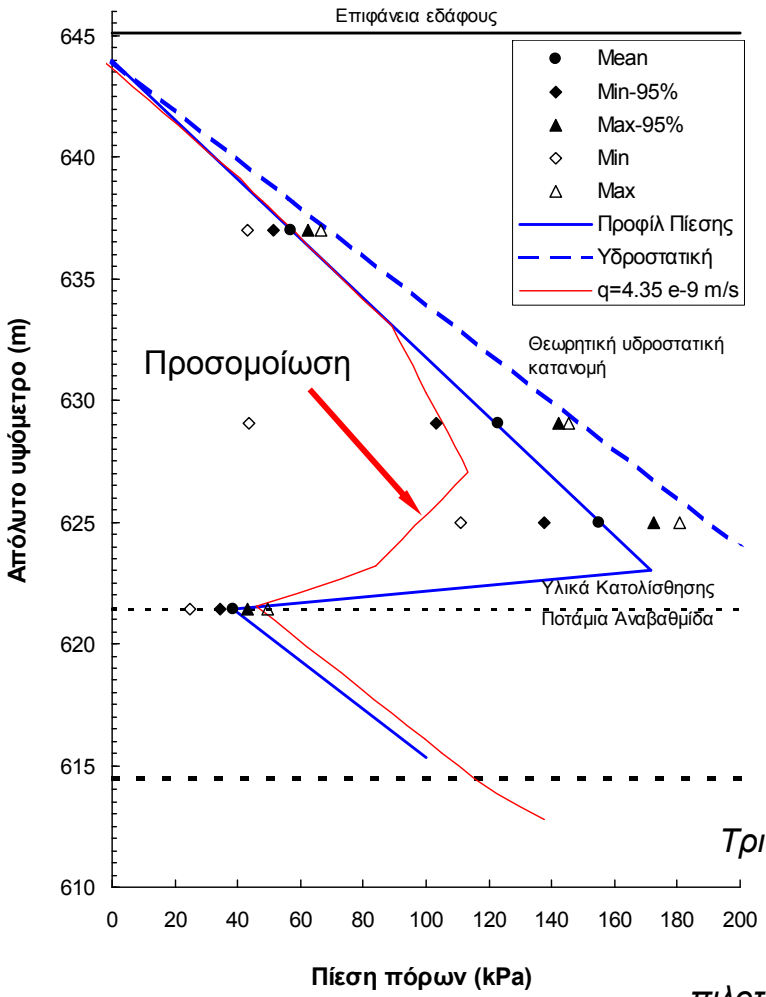
Οριζοντιογραφία πιλοτικής διάταξης αποστράγγισης

Διατομή πιλοτικής διάταξης αποστράγγισης



ΕΔΑΦΟΣ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Α.Ε.

Τμήμα 3.1 της Εγνατίας Οδού (Μ. Περιστέρι – Ανθοχώρι)



1. Κατείσδυση 100 – 200 mm το χρόνο (βροχόπτωση περί τα 1300 mm)

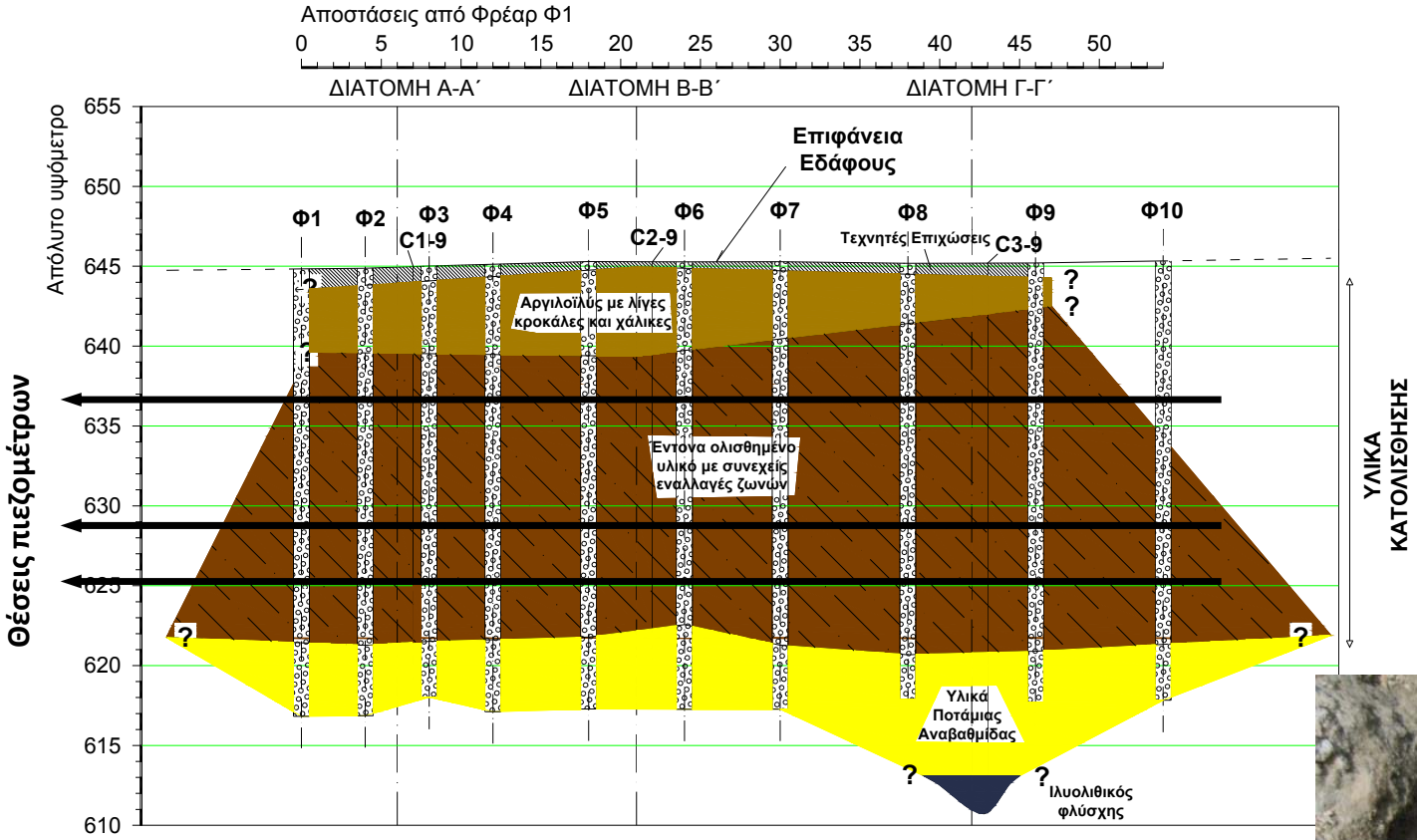
2. Μείωση του συντελεστή διαπερατότητας των υλικών κατολίσθησης με το βάθος (από $2x10^{-7}$ m/s στην επιφάνεια έως $2x10^{-9}$ σε μέγιστο βάθος)

3. Συντελεστής διαπερατότητας ποτάμιας αναβαθμίδας: $2x10^{-4}$ m/s

Αποστραγγιστικά φρέατα

Τριάδες πιεζομέτρων με κεφαλές τύπου Casagrande ανάντη, κατάντη και μεταξύ αποστραγγιστικών φρεάτων πιλοτικής διάταξης αποστράγγισης

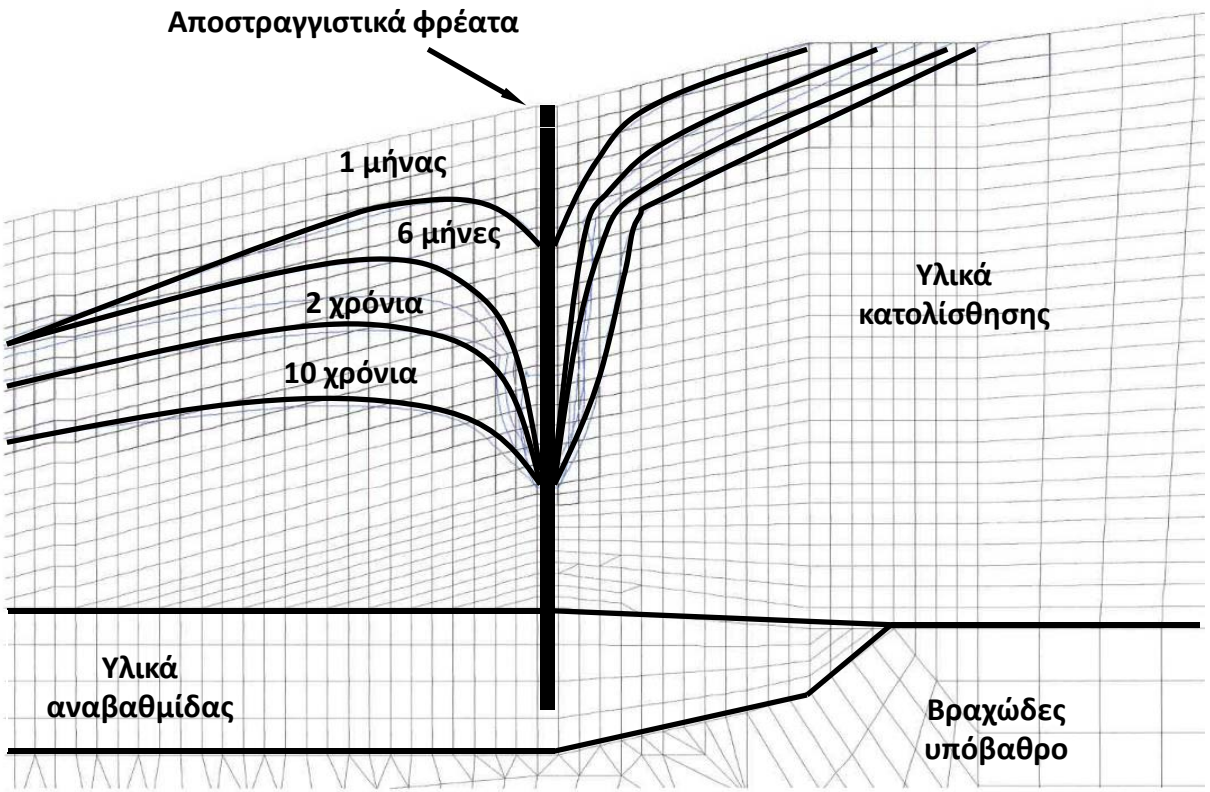
Τμήμα 3.1 της Εγνατίας Οδού (Μ. Περιστέρι – Ανθοχώρι)



Μηκοτομή της πιλοτικής διάταξης αποστράγγισης που υλοποιήθηκε για να επιβεβαιωθεί κατά πόσο τα κατακόρυφα αποστραγγιστικά φρέατα μπορούν να στραγγίσουν διά βαρύτητας τα υλικά κατολίσθησης.

Κατακόρυφο αποστραγγιστικό φρέαρ κατά την κατασκευή του με τον διάτρητο σωλήνα στο κέντρο ήδη στη θέση του και το αμμοχαλικώδες φίλτρο πέριξ αυτού.

Τμήμα 3.1 της Εγνατίας Οδού (Μ. Περιστέρι – Ανθοχώρι)



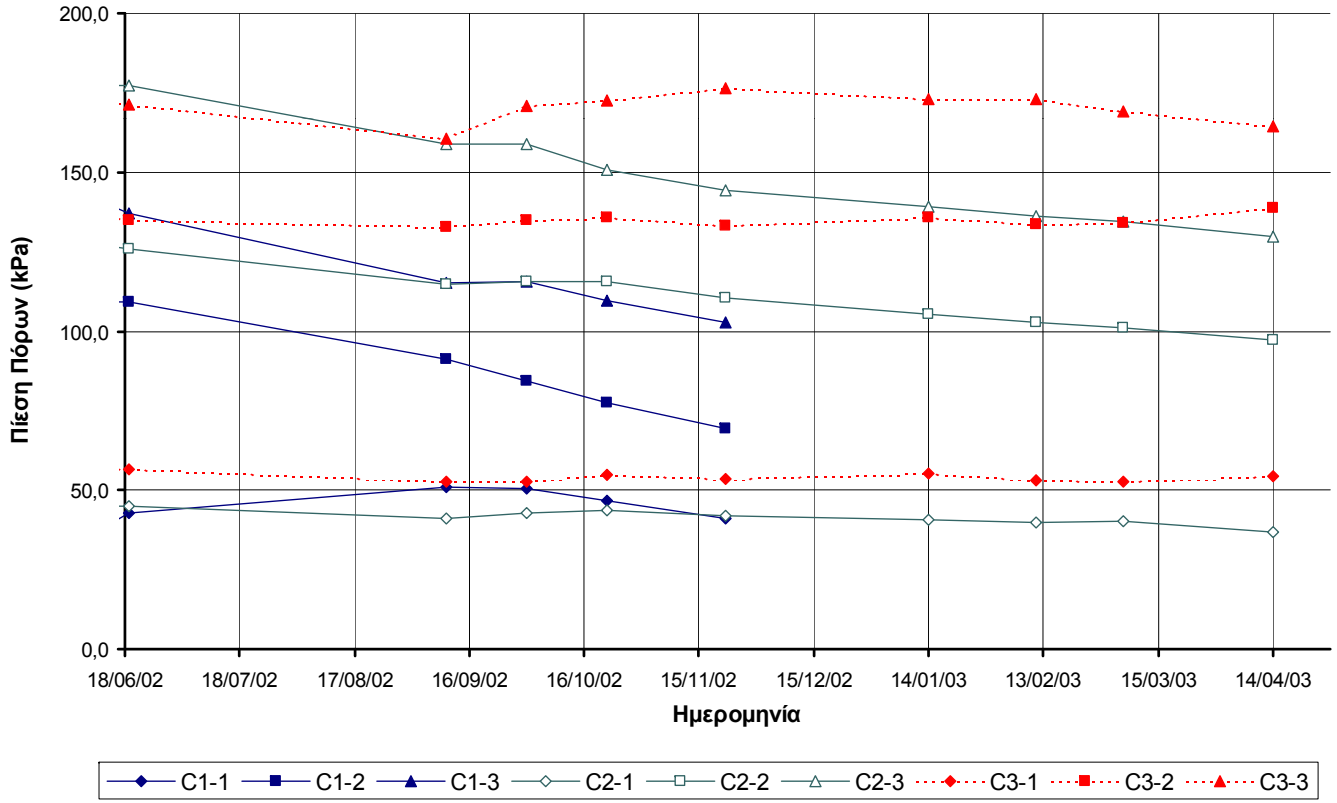
Σκοπός της μελέτης της διαπιστωμένης κατανομής πίεσης πόρων και της επιτυχούς πρόβλεψής της είναι η εισαγωγή στην ανάλυση των κατακόρυφων αποστραγγιστικών φρεάτων για να προβλεφθεί πως και πότε θα στραγγίσουν τα υλικά κατολίσθησης.

Η αρχική μη γραμμική κατανομή της πίεσης πόρων με υποστράγγιση είναι παράδειγμα ***κατάστασης μόνιμης ροής*** *υπό την παρουσία κατείσδυσης από την επιφάνεια και ισορροπίας με μειωμένη πίεση πόρων σε βάθος παρεμβαλλομένων υλικών μικρού και μειούμενου με το βάθος συντελεστή ασφαλείας.*

Το καθεστώς των πιέσεων πόρων από την εισαγωγή των φρεάτων και μετά μέχρι την επίτευξη της νέας κατάστασης υδραυλικής ισορροπίας αποτελεί παράδειγμα ***χρονικά μεταβαλλόμενης ροής****.*

Η επιρροή των αποστραγγιστικών φρεάτων – Απόσταση

ΚΑΤΑΝΤΗ ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΑ ΣΕ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ

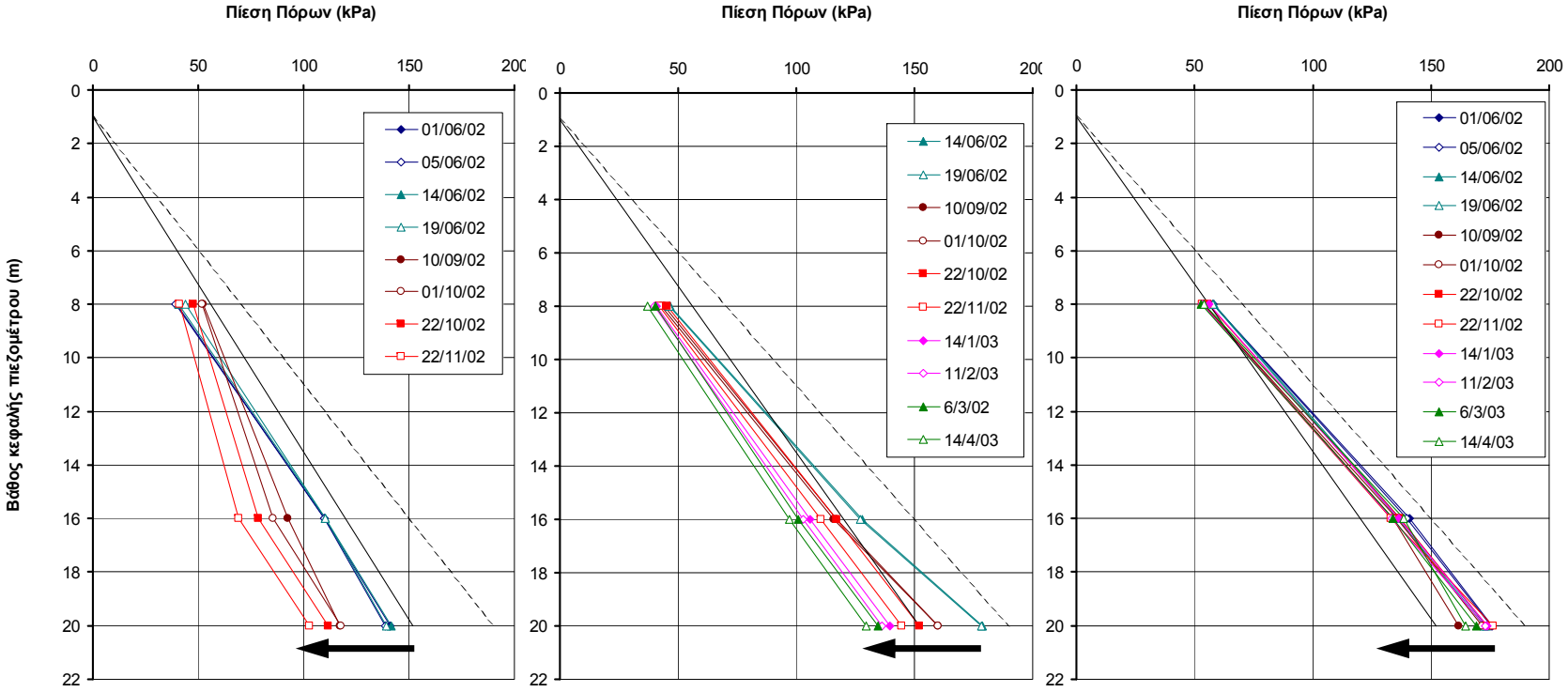


Η πίεση πόρων μειώνεται τόσο περισσότερο όσο μειώνεται η απόσταση των φρεάτων

ΕΔΑΦΟΣ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Α.Ε.

Η επιρροή των αποστραγγιστικών φρεάτων – <u>Θέση ως προς φρέατα</u>

ΔΙΑΤΟΜΗ ΜΕΤΑΞΥ ΦΡΕΑΤΩΝ ΣΕ ΑΠΟΣΤΑΣΗ 4 m

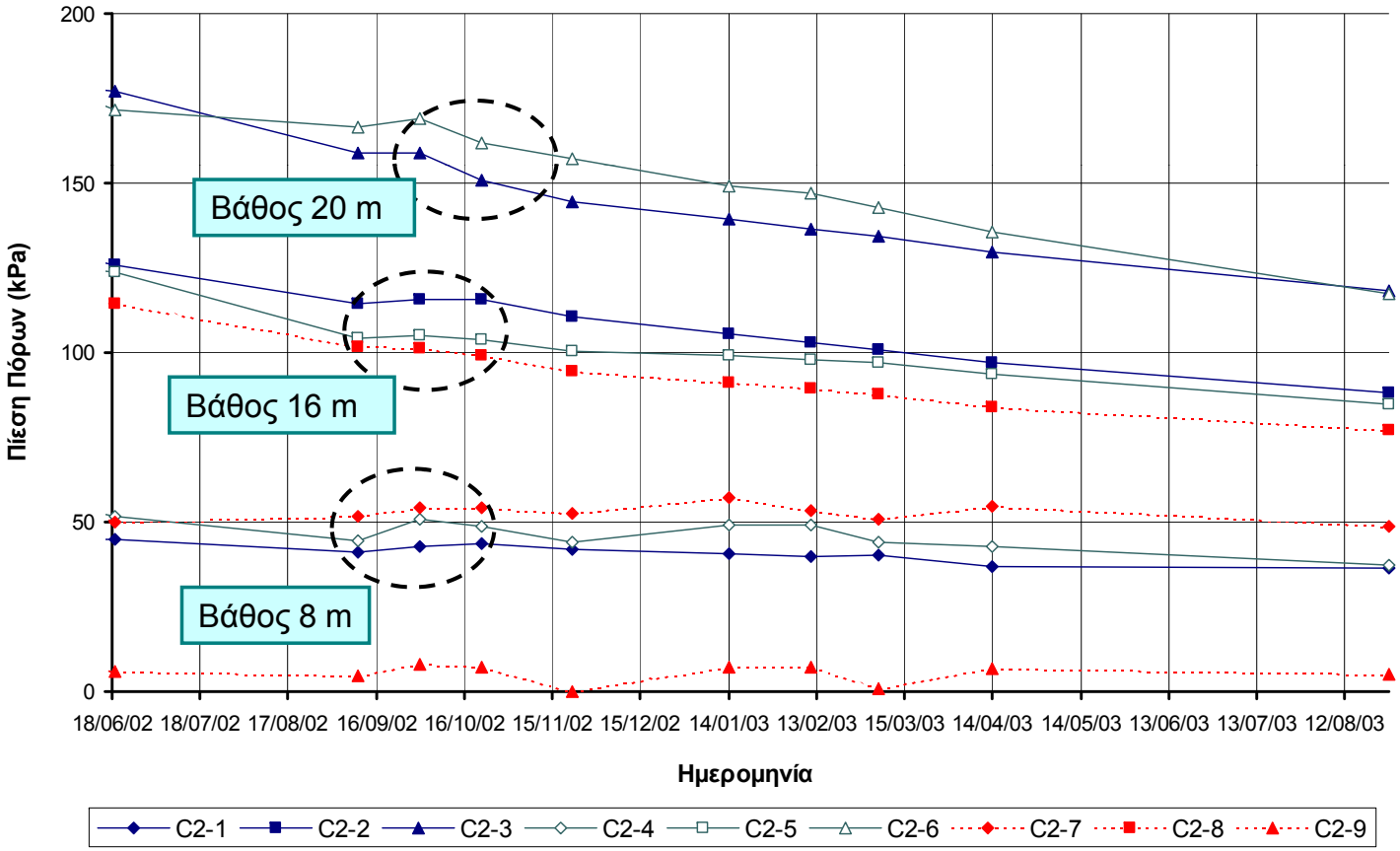


<u>Κατάντη</u> <u>Επί του άξονα</u> <u>Ανάντη</u>

Η πίεση πόρων μειώνεται περισσότερο κατάντη των φρεάτων παρά επί του άξονα αυτών ή ανάντη. Μειώνεται επίσης όσο μεγαλώνει το βάθος.

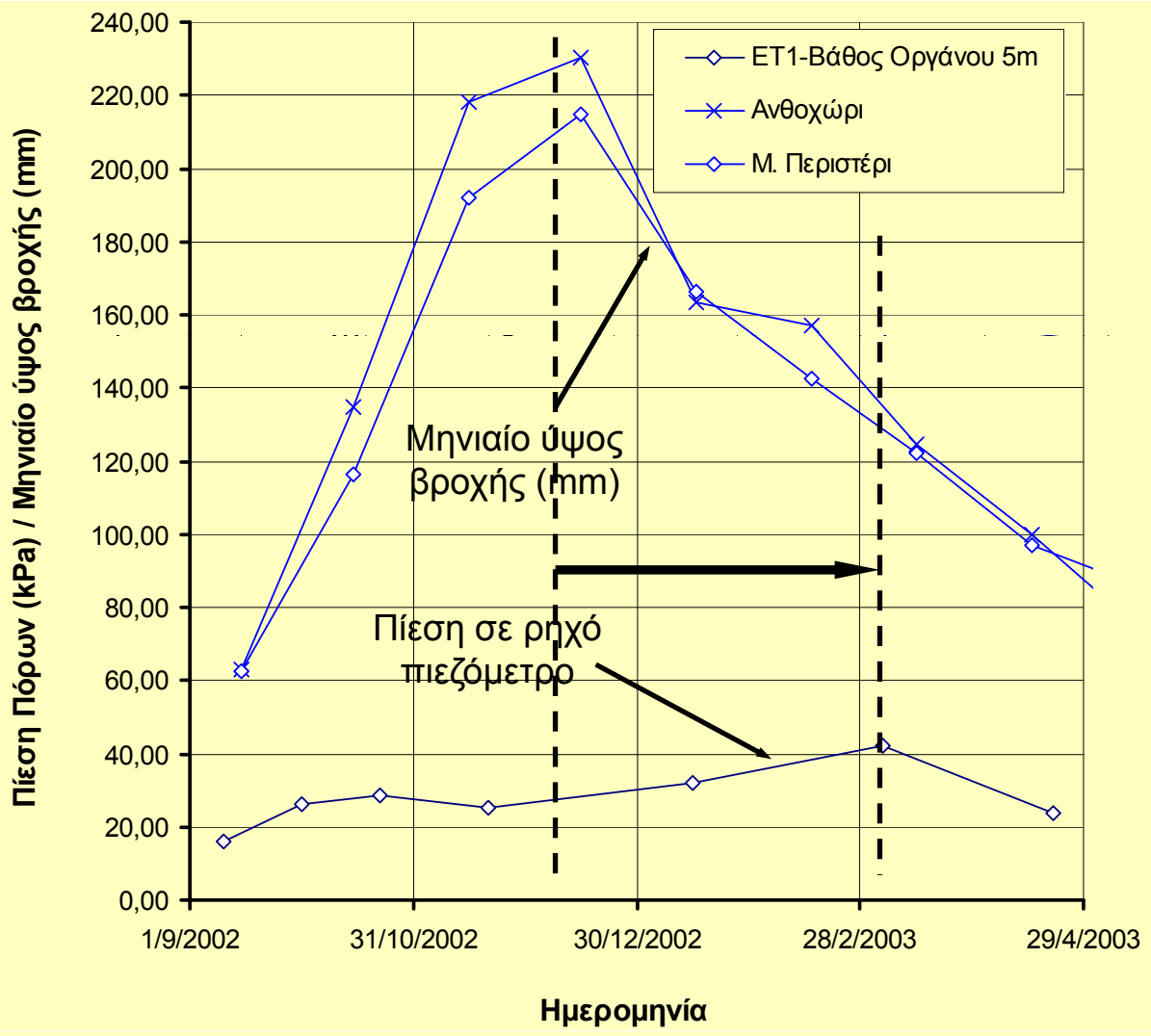
Η επιρροή των αποστραγγιστικών φρεάτων - Βάθος

ΔΙΑΤΟΜΗ ΜΕΤΑΞΥ ΦΡΕΑΤΩΝ ΣΕ ΑΠΟΣΤΑΣΗ 6 m



Η πίεση πόρων μειώνεται τόσο περισσότερο όσο αυξάνεται το βάθος

ΕΔΑΦΟΣ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Α.Ε.

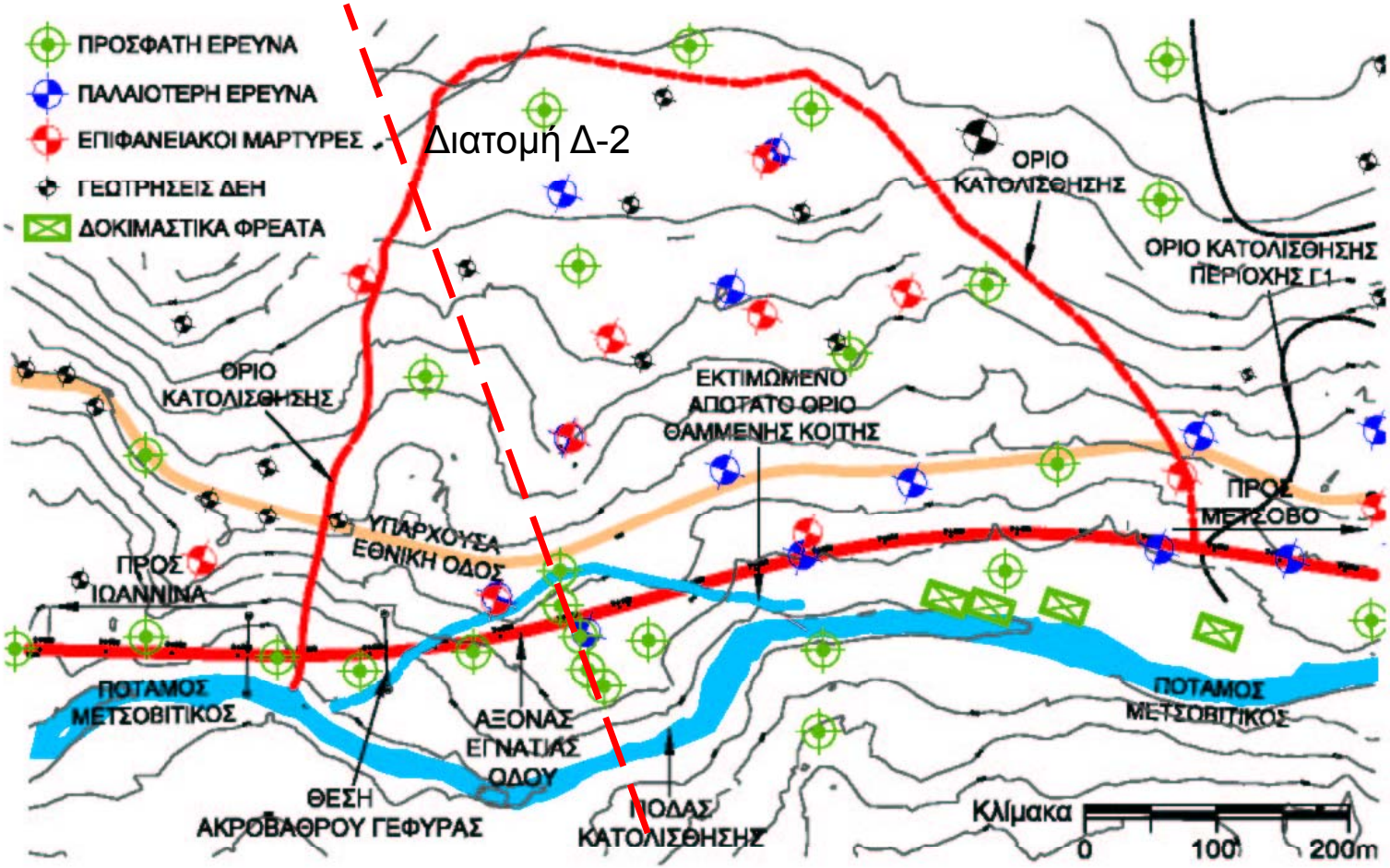


Σε άλλη θέση πάνω από την αναβαθμίδα παρακολουθείτο η κατανομή της πίεσης πόρων χωρίς να υπάρχουν φρέατα.

Σε βάθος από την επιφάνεια η πίεση πόρων παρέμενε σταθερή, ενώ κοντά στην επιφάνεια παρακολουθούσε την τροφοδοσία από την επιφάνεια.

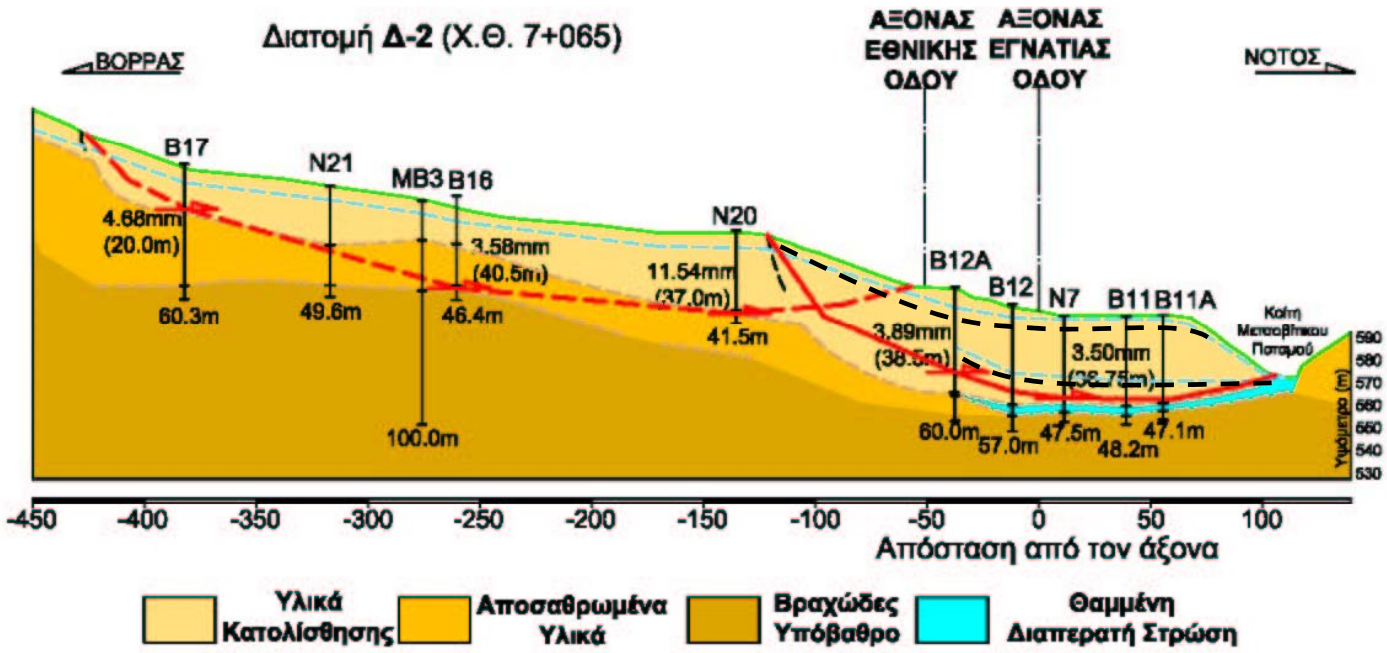
Υπάρχει λογική διαφορά φάσης μεταξύ των μεγίστων των δύο καμπυλών.

Κατολίσθηση της Περιοχής Β του Τμήματος 2.4, Εγνατία Οδός



ΕΔΑΦΟΣ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Α.Ε.

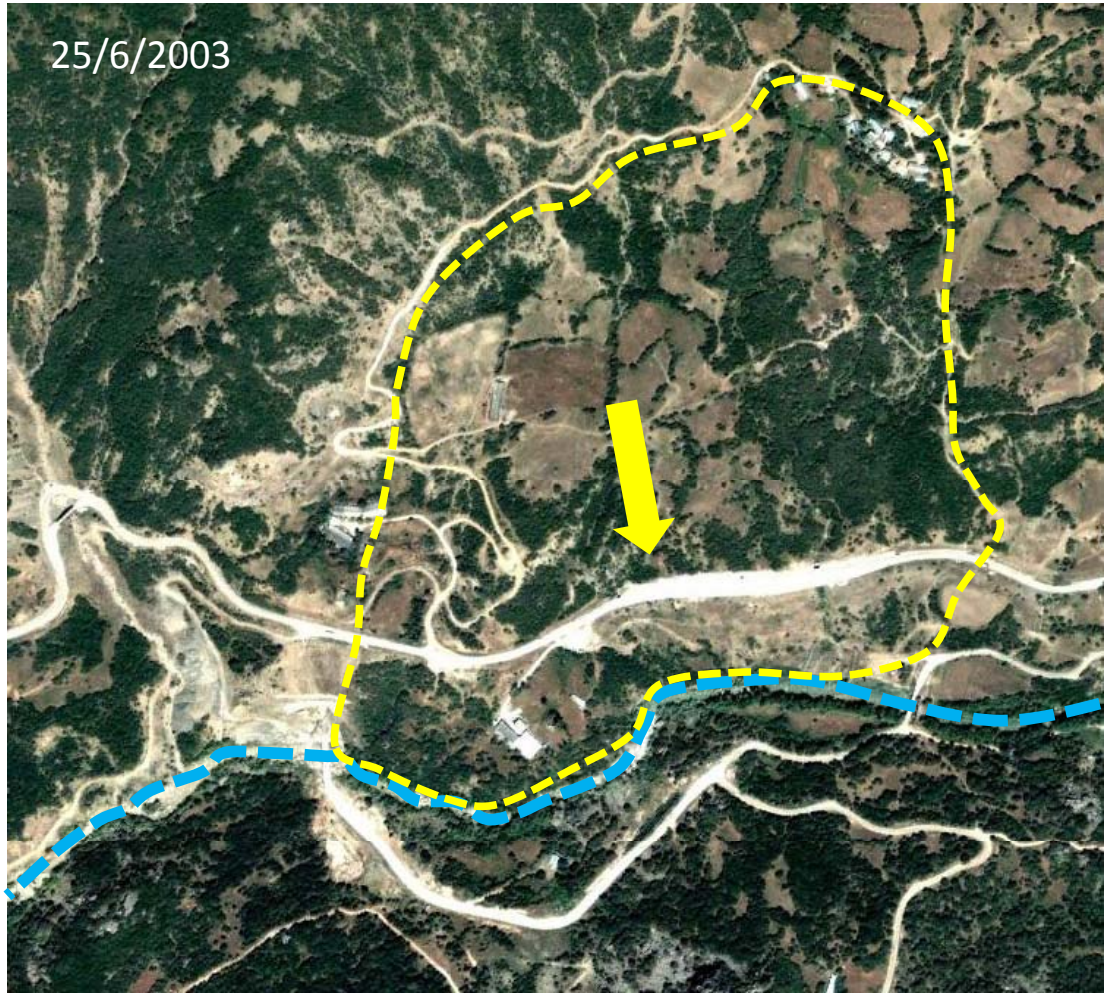
Κατολίσθηση της Περιοχής Β του Τμήματος 2.4, Εγνατία Οδός

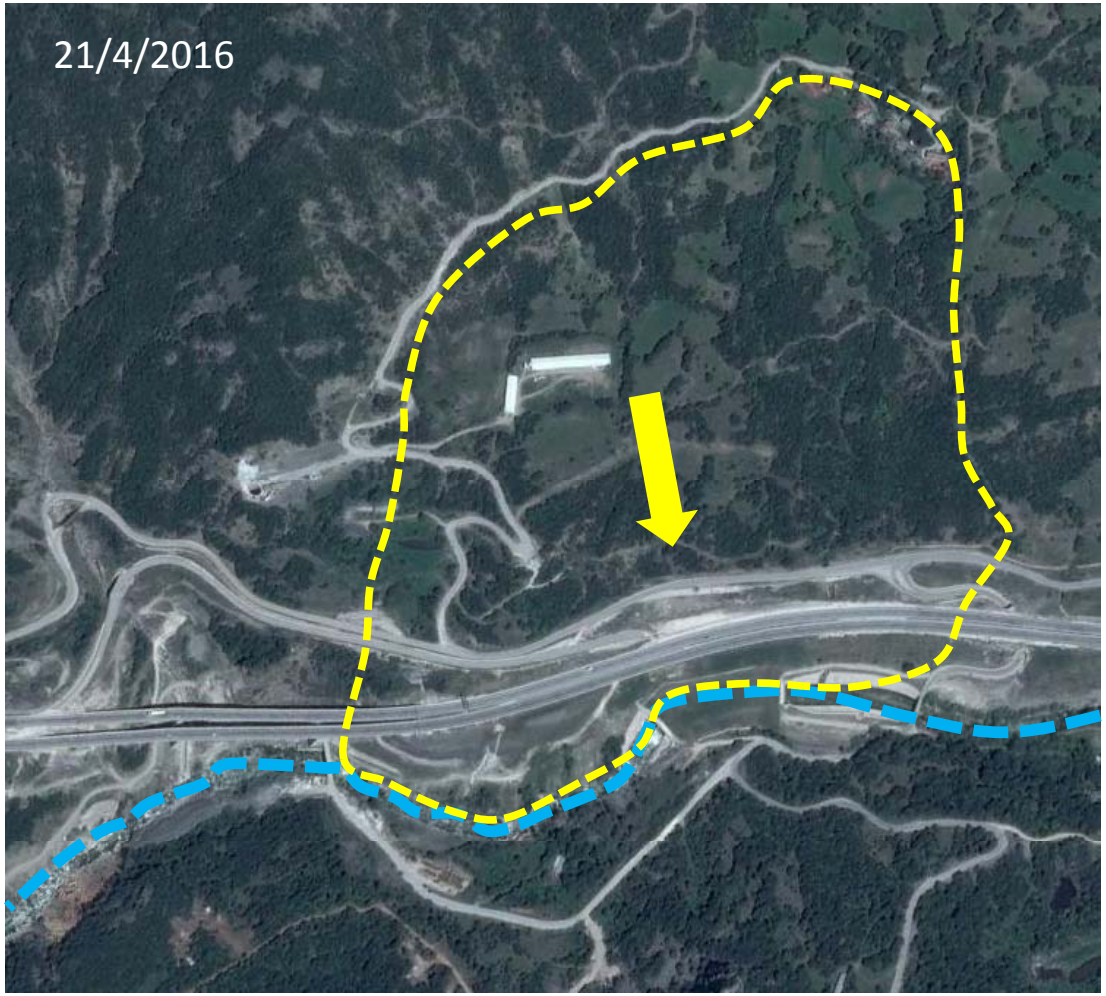


Η πίεση πόρων εντός των υλικών κατολίσθησης και της θαμμένης κοίτης υπακούν σε διαφορετική πιεζομετρία –επικρεμάμενος υπόγειος ορίζοντας και πιεζομετρία που καθορίζεται από τη στάθμη στη σημερινή κοίτη του ποταμού αντίστοιχα

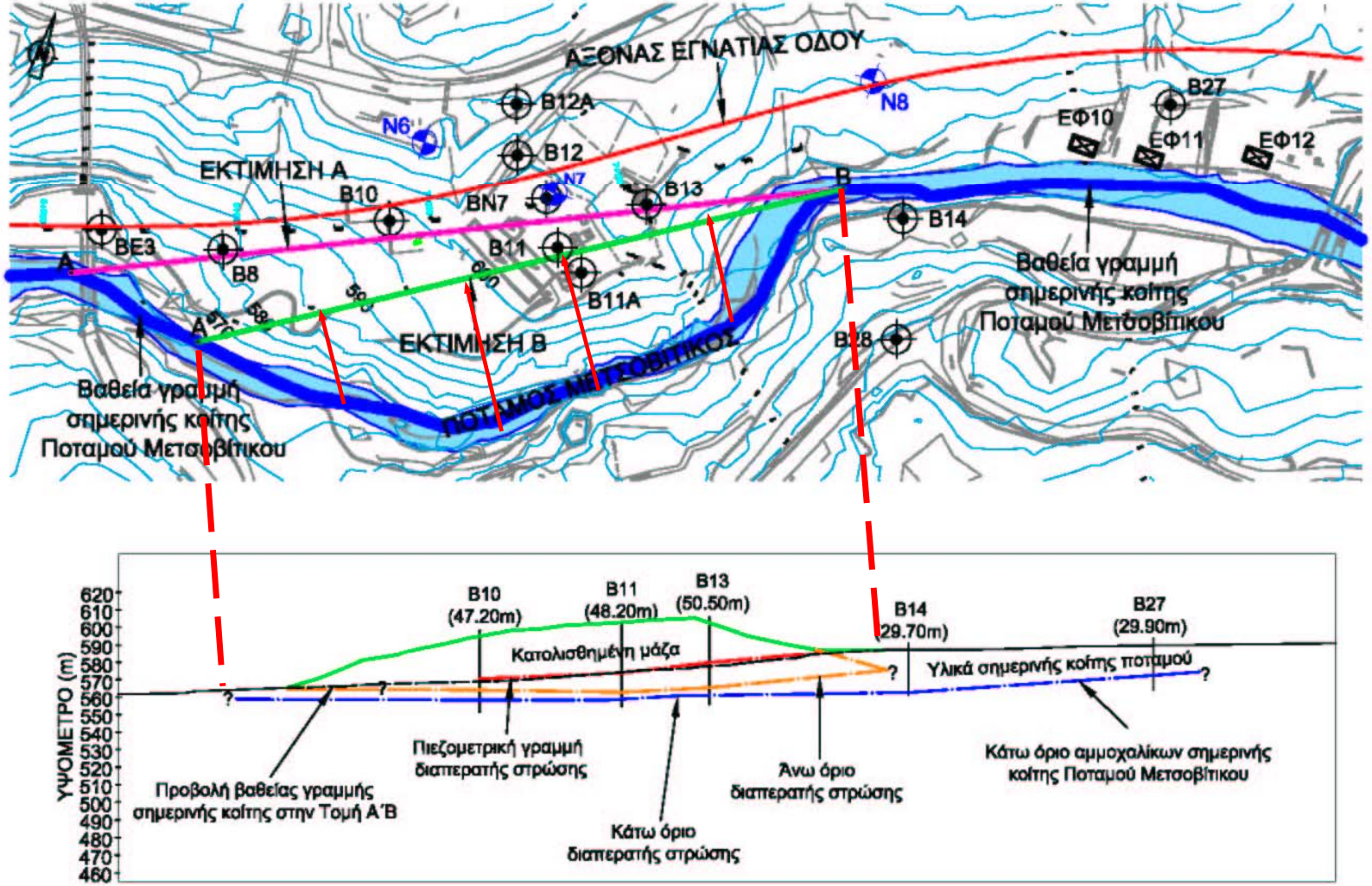
ΕΔΑΦΟΣ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Α.Ε.

Κατολίσθηση της Περιοχής Β του Τμήματος 2.4, Εγνατία Οδός
Εικόνες από το Google Earth





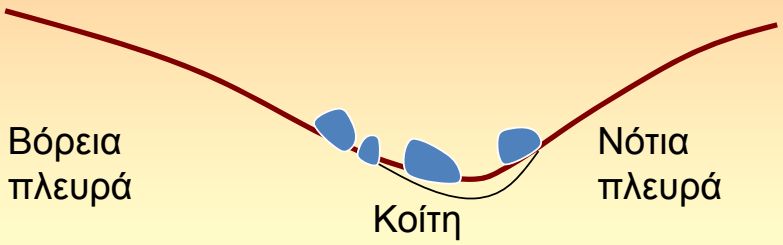
Κατολίσθηση της Περιοχής Β του Τμήματος 2.4, Εγνατία Οδός



ΕΔΑΦΟΣ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Α.Ε.

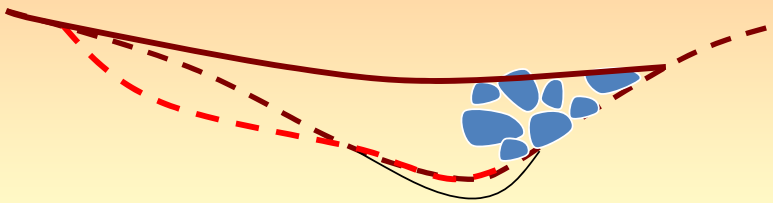
Πιθανή εξέλιξη της κατολίσθησης της Περιοχής Β, 2.4

1. Εκτιμώμενο αρχικό σχήμα της κοιλάδας (επιφάνεια του εδάφους και αρχική κοίτη)



Ασβεστολιθικοί ογκόλιθοι

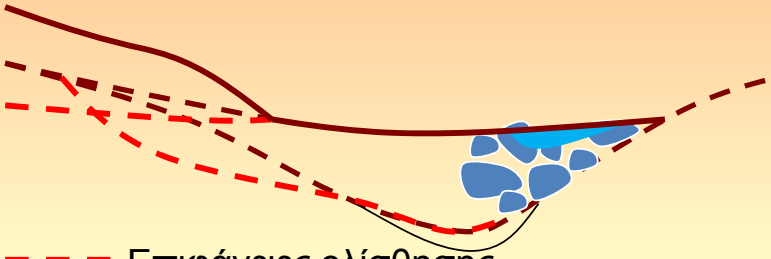
2. Πρώτη κατολίσθηση. Η αρχική κοίτη καλύπτεται και η ροή διακόπτεται



Επιφάνεια ολίσθησης

Σπρωγμένοι ασβεστολιθικοί ογκόλιθοι

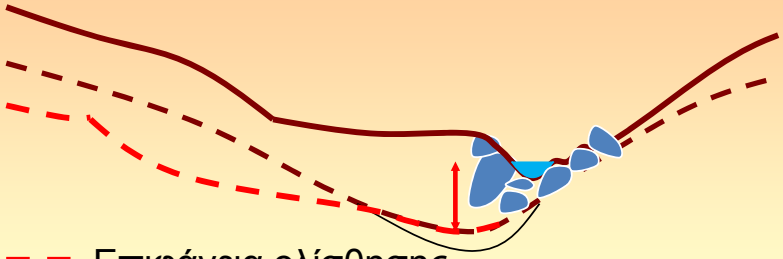
3. Δεύτερη κατολίσθηση. Το ποτάμι διαβρώνει τα υλικά κατολίσθησης



Επιφάνειες ολίσθησης

Ασβεστολιθικοί ογκόλιθοι συνδέουν τη θαμμένη κοίτη με τη νέα

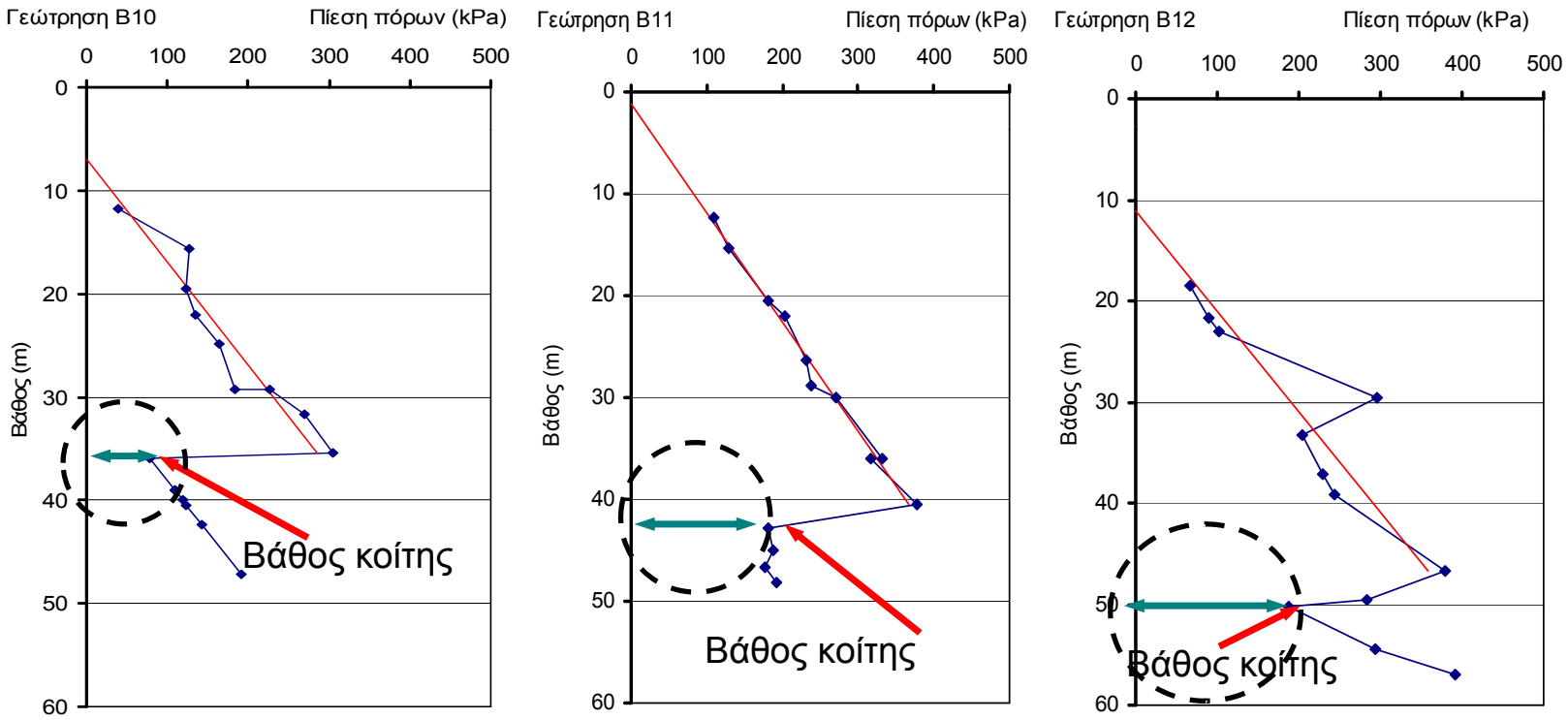
4. Σημερινή στρωματογραφία και κοίτη



Επιφάνεια ολίσθησης

Ασβεστολιθικοί ογκόλιθοι συνδέουν την παλιά κοίτη με τη νέα

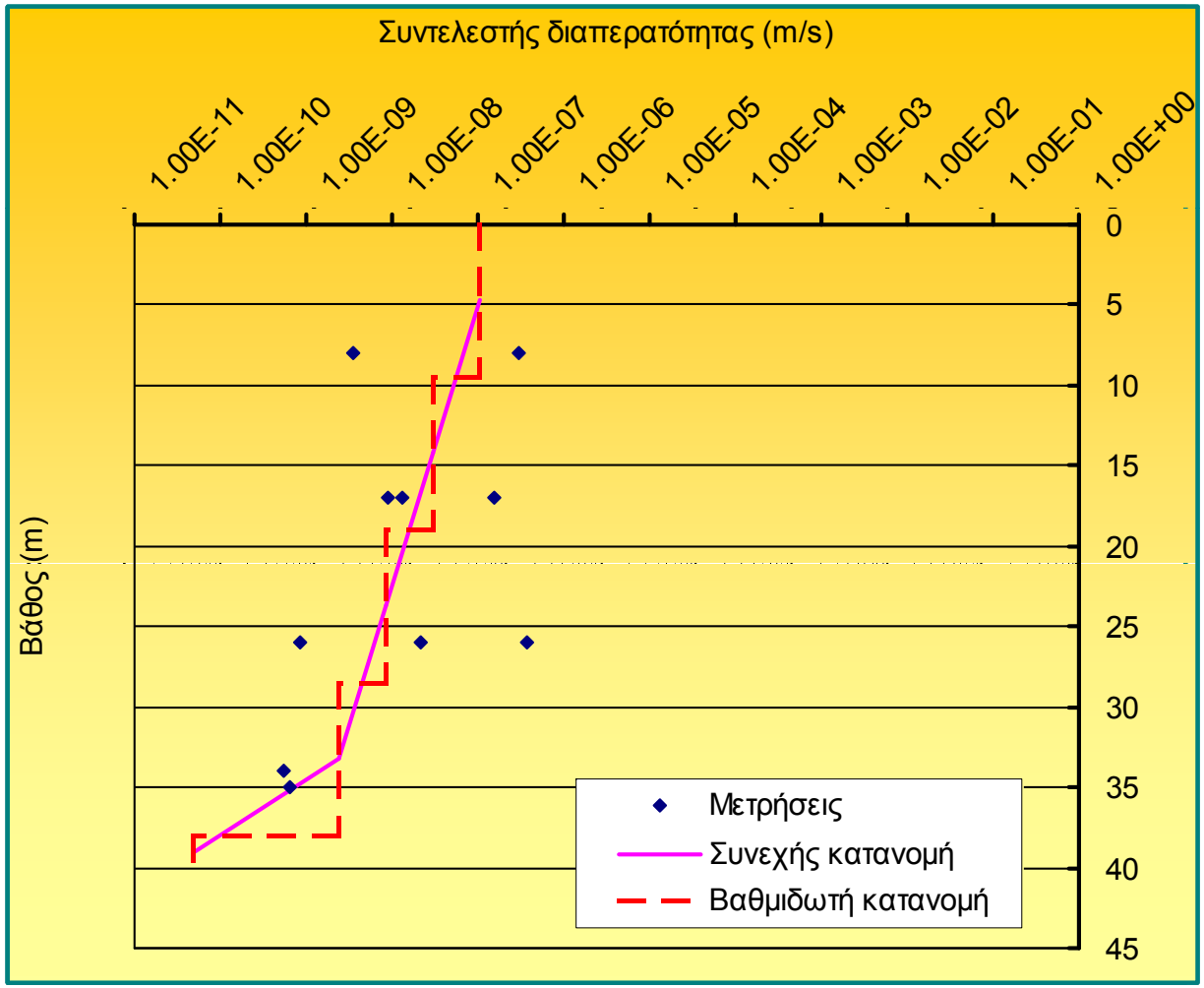
Κατολίσθηση της Περιοχής Β του Τμήματος 2.4, Εγνατία Οδός



Πίεση από πρωινές στάθμες σε γεωτρήσεις που διέτρησαν την παλαιά κοίτη – Χαρακτηριστική μορφή υποστράγγισης

ΕΔΑΦΟΣ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Α.Ε.

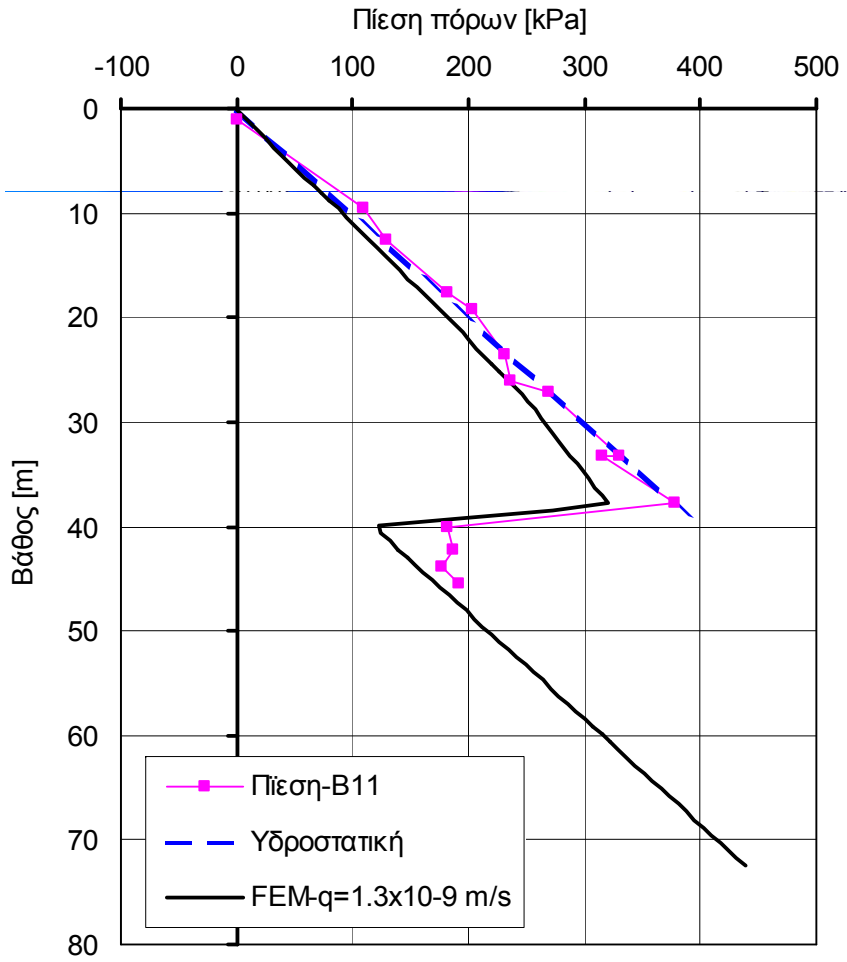
Κατολίσθηση της Περιοχής Β του Τμήματος 2.4, Εγνατία Οδός

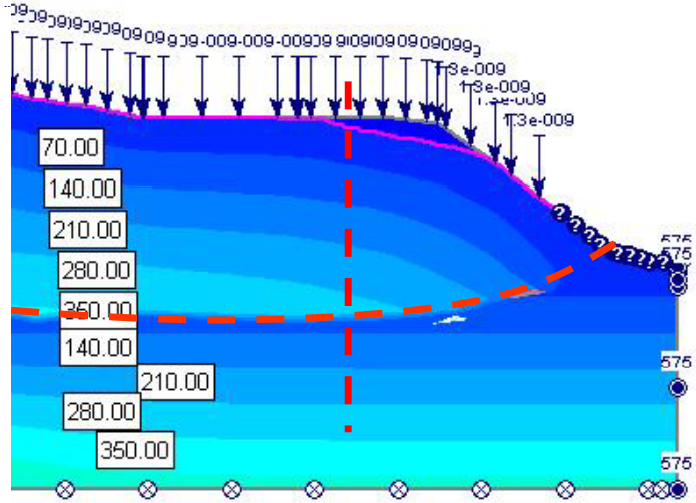


Προσοχή: *Δυστυχώς τα περισσότερα προγράμματα δεν «αντιλαμβάνονται» μαθηματική εξέλιξη του συντελεστή διαπερατότητας με την τάση (βάθος), ειδικά αυτά που είναι μόνο για αναλύσεις υπόγειας ροής. Σε αυτές τις περιπτώσεις εισάγουμε «τεχνητά» στρώσεις μόνο και μόνο για να τους αποδώσουμε άλλες τιμές του συντελεστή διαπερατότητας και να προσομοιώσουμε την γραμμική μείωση με το βάθος με μια βαθμιδωτή κατανομή μείωσης του συντελεστή διαπερατότητας με το βάθος.*

ΕΔΑΦΟΣ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Α.Ε.

Κατολίσθηση της Περιοχής Β του Τμήματος 2.4, Εγνατία Οδός

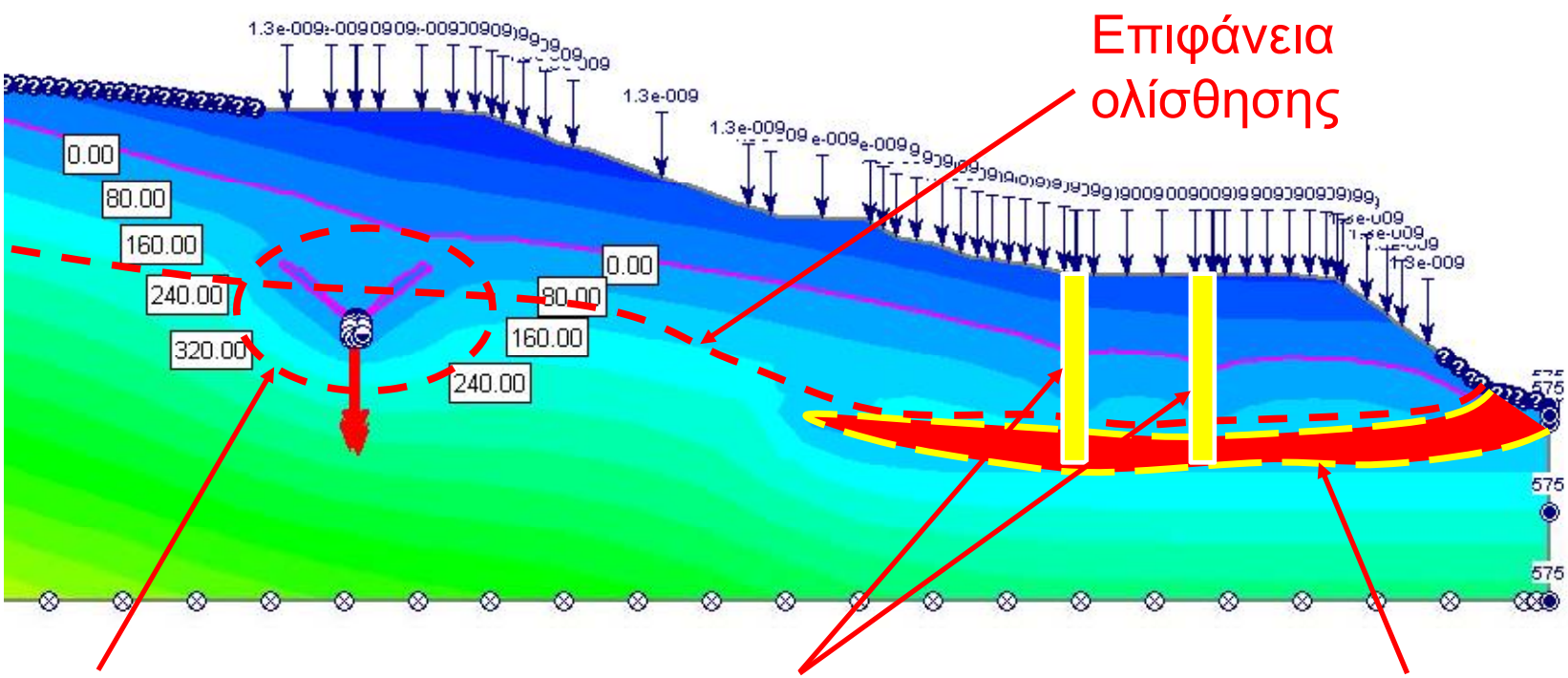




Βαθμονόμηση μοντέλου υπόγειας ροής για το αρχικό καθεστώς πιέσεων πόρων

ΕΔΑΦΟΣ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Α.Ε.

Κατολίσθηση της Περιοχής Β του Τμήματος 2.4, Εγνατία Οδός



Στραγγιστική σήραγγα με «βεντάλια» αποστραγγιστικών γεωτρήσεων

Κατακόρυφα αποστραγγιστικά φρέατα από την επιφάνεια προς την ποτάμια αναβαθμίδα

Ποτάμια αναβαθμίδα

Σκοπός της μελέτης της διαπιστωμένης κατανομής πίεσης πόρων και της επιτυχούς πρόβλεψής της είναι η εισαγωγή στην ανάλυση των κατακόρυφων αποστραγγιστικών φρεάτων για να προβλεφθεί πως και πότε θα στραγγίσουν τα υλικά κατολίσθησης.

Επειδή αυτά δεν έφθαναν ως μόνο μέτρο επαύξησης του συντελεστή ασφαλείας στο επιθυμητό επίπεδο, μελετήθηκε και αποστραγγιστική σήραγγα, η επιρροή της οποίας εισήχθη επίσης.

ΕΔΑΦΟΣ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Α.Ε.

Συμπεράσματα για τις κατολισθήσεις με κινήσεις που έχουν καλύψει παλαιά κοίτη ποταμών:

- Εκεί που τα υλικά κατολίσθησης υπέρκεινται της θαμμένης κοίτης υπάρχει υποστράγγιση των υλικών κατολίσθησης.
- Για να τεκμηριωθεί το φαινόμενο –κυρίως η μη γραμμική κατανομή πίεσης πόρων- απαιτείται εκτεταμένη γεωτεχνική έρευνα με μεγάλο αριθμό πιεζομέτρων τοποθετημένων σε κατάλληλες θέσεις και βάθη, με τις αντίστοιχες δοκιμές διαπερατότητας πεδίου
- Η κατανομή της πίεσης πόρων προβλέπεται με επιτυχία αν ληφθούν υπόψη τα βροχομετρικά δεδομένα της περιοχής και η μείωση του συντελεστή διαπερατότητας των υλικών καταολίσθησης με το βάθος.
- Η πίεση πόρων μειώνεται περισσότερο κατάντη των φρεάτων. Μειώνεται δε τόσο περισσότερο όσο μικρότερη είναι η απόσταση των φρεάτων και όσο μεγαλύτερο το βάθος εντός των υλικών κατολίσθησης.

Συμπεράσματα περί υποστράγγισης

- Για να προβλεφθούν κατανομές πίεσης πόρων σε υλικά κατολίσθησης με υποστράγγιση, πρέπει:

  α) Να εισαχθεί μείωση του συντελεστή διαπερατότητας με το βάθος

  β) Να εισαχθεί κατείσδυση από την επιφάνεια

  γ) Περαιτέρω μείωση του συντελεστή διαπερατότητας στην περιοχή της επιφάνειας ολίσθησης και συχνά ανισοτροπία ως προς αυτό το μέγεθος στην ίδια περιοχή

- Η ανισοτροπία ως προς τον συντελεστή διαπερατότητας στην περιοχή της επιφάνειας ολίσθησης δεν είναι απλώς αριθμητική απαίτηση αλλά φυσική συνέπεια του γεωλογικού προσομοιώματος, η οποία αντίστοιχα δεν δικαιολογείται φυσικά στην υπόλοιπη μάζα των υλικών κατολίσθησης

Συνάδελφοι, υπηρεσίες και εταιρείες που συνέβαλαν:

Από την **ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε.** (*νυν και πρώην μέλη*)

- Γ. Ντουνιάς
- Σ. Καβουνίδης
- Λ. Σωτηρόπουλος
- Α. Ντουρούπη
- Χρ. Μαυρομμάτη
- Χρ. Κουτσούμπα
- Α. Σιγάλας
- Δ. Ζαχαριάδης
- Κ. Καλλέργης

Από την **ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ Α.Ε.** (*νυν και πρώην μέλη*): Ε. Σακουμπέντα, Β. Χουσιάδας, Μ. Χαραλαμπάκης, Ε. Ζιγκιριάδου, Μ. Σκέμπας, Α. Λειβαδάς

Ως σύμβουλοι της ΕΟΑΕ:

καθ. Π. Μαρίνος, H. Brandl, H. Poulos

Άλλες εταιρείες ως συνεργάτες ή γεωερευνητές:

ΓΕΩΣΥΝΟΛΟ ΕΠΕ, ΓΕΩΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΤΕ, ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΤΕ, ΑΣΠΡΟΥΔΑΣ & ΣΥΝΕΡΓΑΤΕΣ ΕΕ, ΓΕΝΙΚΗ ΜΕΛΕΤΩΝ-ΙΣΤΡΙΑ ΕΠΕ, ΤΡΙΤΩΝ ΑΕ