

Γεωτεχνική Έρευνα (σε υπόγεια έργα & σήραγγες)

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

ΔΠΜΣ Σχεδιασμός & Κατασκευή Υπογείων Έργων

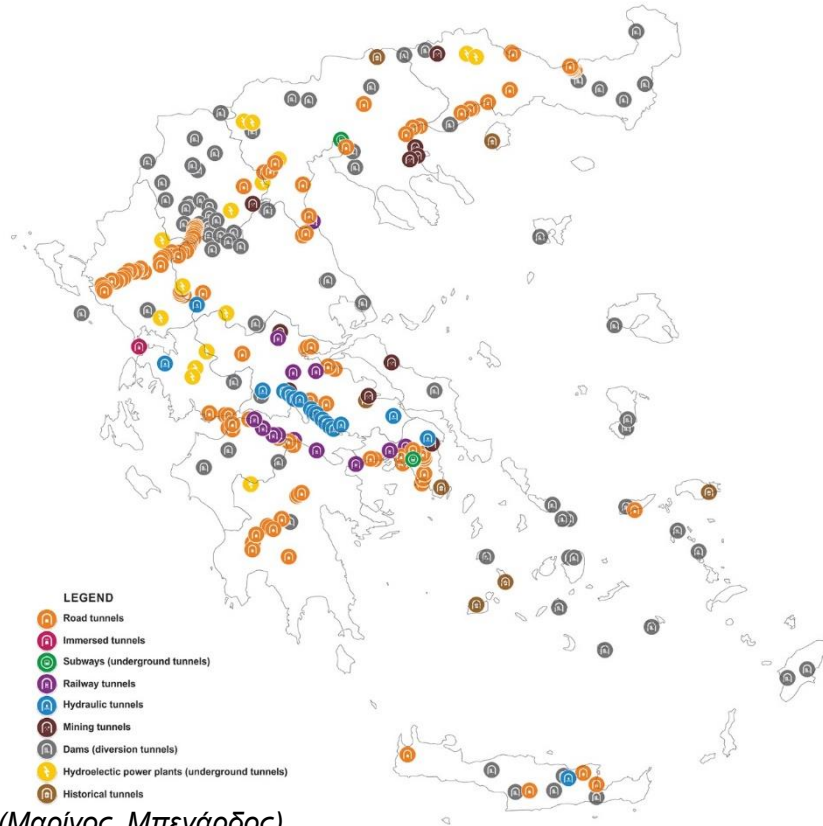
Μάθημα: *Γεωτεχνική και Γεωφυσική Έρευνα Υπεδάφους*

Αναπλ. Καθηγητής Ι. Ζευγώλης

Εισαγωγή

Εισαγωγή

Συνολικό μήκος οδικών και σιδηροδρομικών σιηράγγων που κατασκευάστηκαν στην Ελλάδα την τελευταία εικοσαετία **≈ 350 km!**



Είναι τόσο «απλό» να κατασκευάζονται σιηράγγες και υπόγεια έργα;;;

ΜΙΑ ΨΕΥΔΟΠΟΣΟΤΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΙΗΡΑΓΓΩΝ ΕΝΑΝΤΙ ΟΛΙΚΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ



1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Θ.Π. Τάσιος

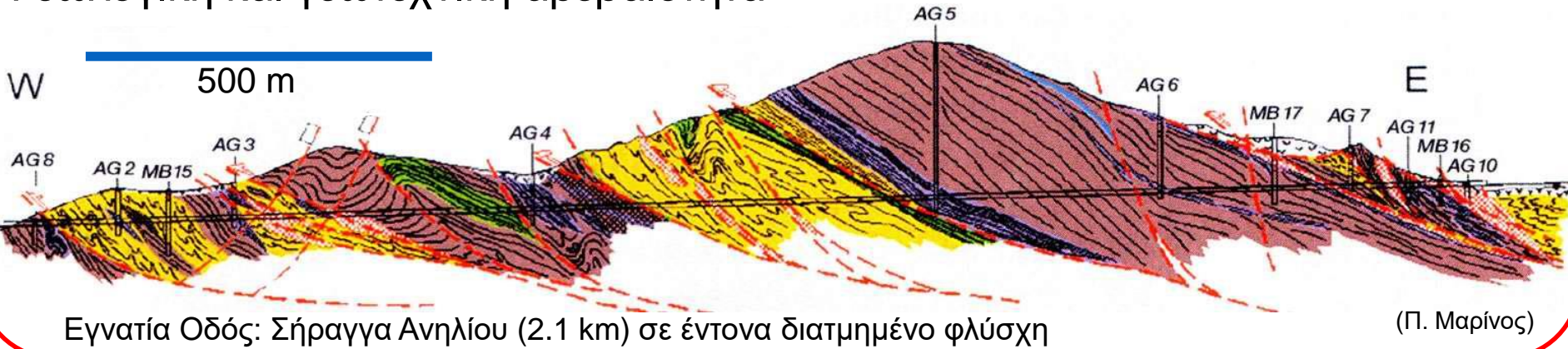
Έλληνας ακαδημαϊκός,
Καθηγητής ΕΜΠ,
αρθρογράφος και
συγγραφέας (1930 -).

Μεγάλη η φιλοδοξία-μας να τα βάλουμε με τον Πλούτο-να: Καί θεός είναι, καί σκοτεινός, καί εκδικητικός. Έτσι εξηγείται γιατί η Μηχανική των Σιηράγγων δέν έχει ακόμη αρτιωθεί σε «ακριβή» επιστήμη. Παρα ταύτα, ο ωραίος αγώνας του Μηχανικού «ενάντια στο βάθος και στο νερό», βρίσκει τρόπους να παλεύει με τον θεό και να κατασκευάζει σιηράγγες – και μόνον οι γραφειοκράτες των Βρυξελλών γκρινιάζουν «διατί αι μελέται δέν ήσαν ακριβείς;».

*Τάσιος, Θ. Π. (2004). Μία ψευδοποσοτική θεώρηση σχεδιασμού σιηράγγων έναντι ολικής αστοχίας διατομής. *Ανάλυση & Διαστασιολόγηση Μόνιμης Επένδυσης Σιηράγγων*. Αθήνα, ΕΕΣΥΕ.

Ιδιαιτερότητες σηράγγων (και λοιπών υπόγειων έργων)

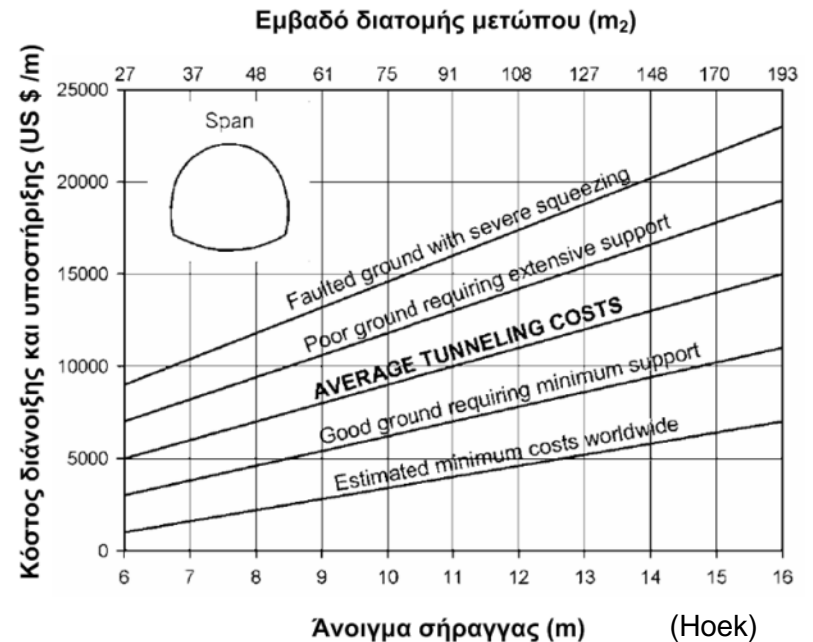
Γεωλογική και γεωτεχνική αβεβαιότητα



Υψηλές τεχνικές απαιτήσεις

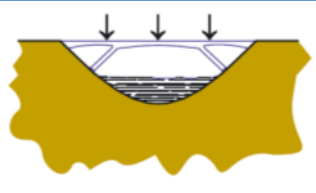



Υψηλό κόστος



Θεμελιώδης διαφορά στον σχεδιασμό επιφανειακών και υπόγειων έργων:

Ο σχεδιασμός και η κατασκευή σηράγγων και υπόγειων έργων αποτελεί ένα ιδιαίτερα πολύπλοκο τεχνικό πρόβλημα, καθώς είναι **πολύ δύσκολος** ο *a priori* (εκ των προτέρων) **καθορισμός** των βασικών **παραμέτρων σχεδιασμού** (σε σύγκριση με τα επιφανειακά έργα).

Επιφανειακά vs. Υπόγεια Έργα		
Μέσο (υλικό κατασκευής)	●	○
Δράσεις (φορτία επί της κατασκευής)	●	○
Αντιστάσεις (απόκριση υπό την έννοια τάσεων – παραμορφώσεων)	●	○
● a priori καθορισμένα ○ μη προκαθορισμένα	(Lunardi 2008)	

Τις επιπτώσεις από αυτή τη δυσκολία έρχεται κατά το δυνατόν να μετριάσει η **γεωτεχνική έρευνα**...

Γεωτεχνική έρευνα (ή διασκόπηση ή διερεύνηση) –

geotechnical investigation

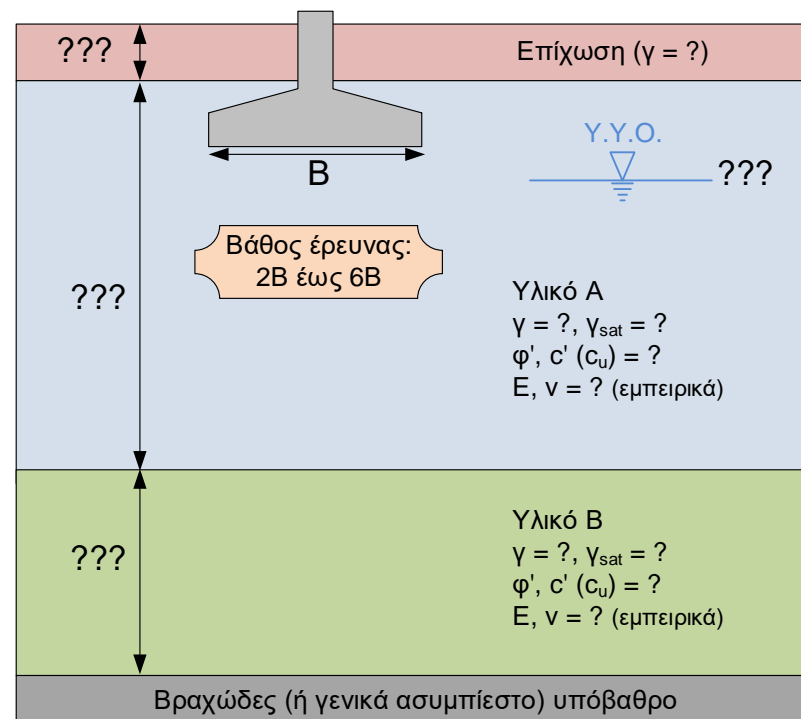
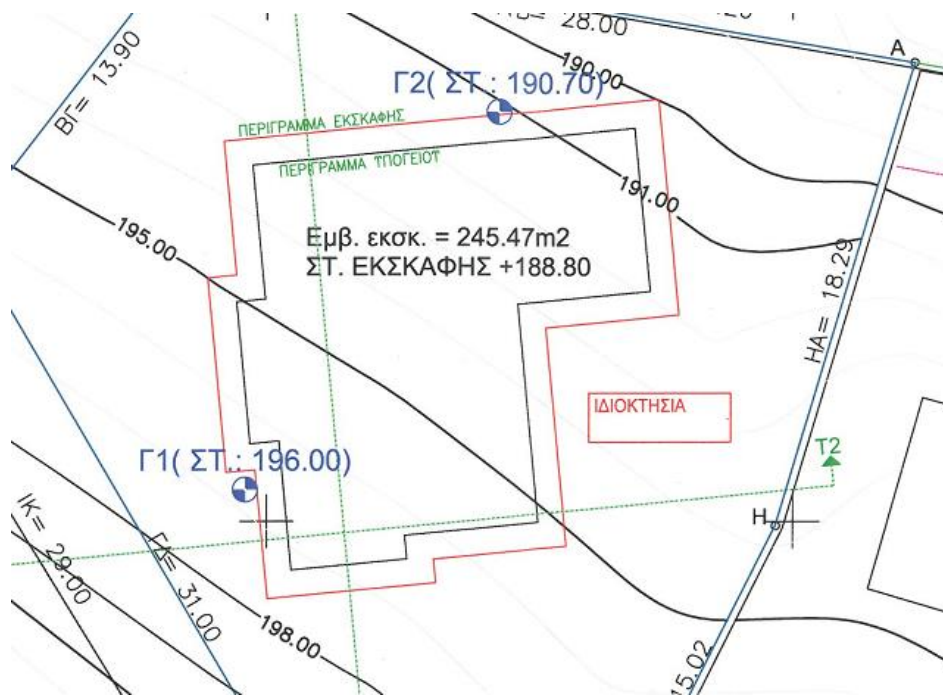
Το σύνολο των δραστηριοτήτων που έχει ως στόχο τη μόρφωση μιας **3Δ*** **εικόνας των θέσεων** (αλληλουχία, πάχος, πλευρική έκταση) και των **γεωτεχνικών χαρακτηριστικών** όλων των βασικών γεωλογικών στρώσεων [οι οποίες επηρεάζονται ή/και επηρεάζουν την υλοποίηση μιας γεωτεχνικής κατασκευής], καθώς και τον προσδιορισμό του σχετικού **υδραυλικού καθεστώτος** (Κωστόπουλος, 2005)

* Συνήθης μόρφωση σε 2Δ «εικόνες» (κάτοψη / οριζοντιογραφία, διατομές σε κρίσιμες ή χαρακτηριστικές θέσεις, μηκοτομή, κ.λπ.), οι οποίες συνολικά συνθέτουν μια προσεγγιστική 3Δ απεικόνιση.

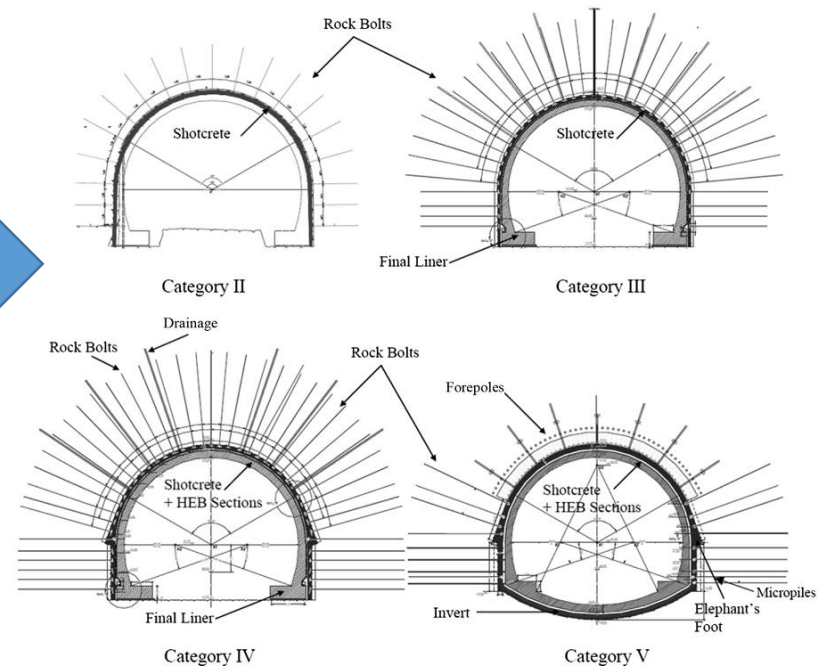
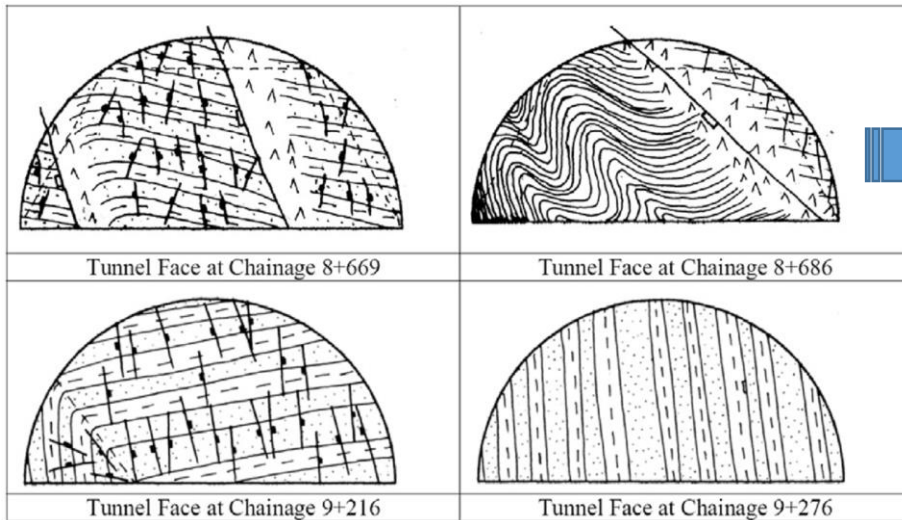
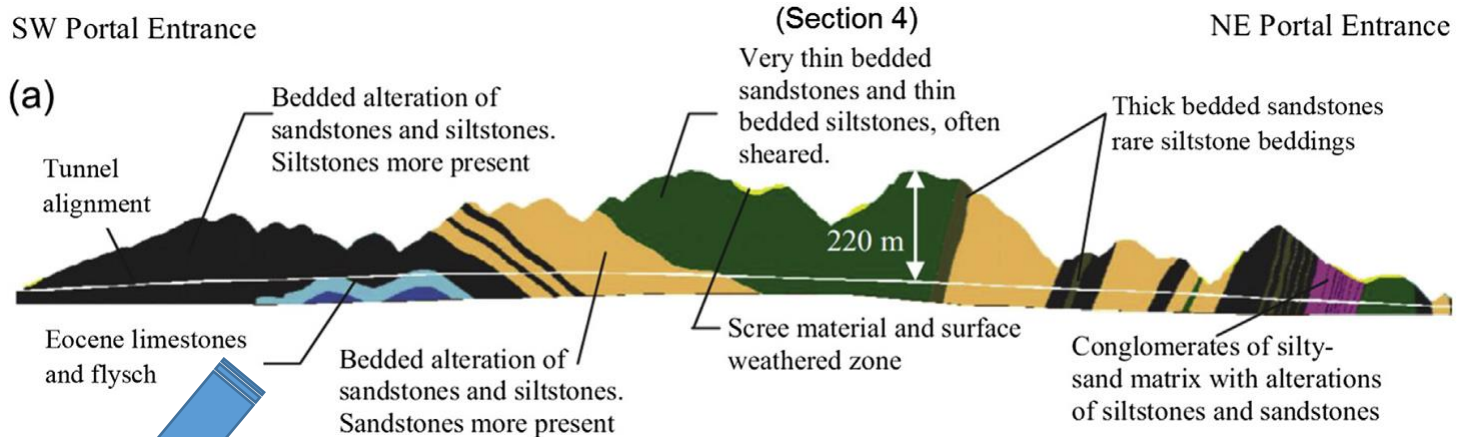
Όσο «μεγαλύτερο» είναι ένα έργο, τόσο δυσκολότερη η μόρφωση 2Δ/3Δ απεικόνισης!

Ξεκινώντας από ένα σχετικά απλό πρόβλημα γεωτεχνικής διερεύνησης, π.χ. **θεμελίωση κτηρίου ενός ορόφου με μεμονωμένα επιφανειακά πέδιλα...**

Μικρός αριθμός γεωτρήσεων («μία = καμία»), δοκιμές κατάταξης, προσδιορισμός διατμητικής αντοχής



... έως κάτι πιο σύνθετο, π.χ. σχεδιασμός και κατασκευή σήραγγας σε **δύσκολες και μεταβαλλόμενες** γεωτεχνικές συνθήκες



Πηγή: Langford, J.C., Vlachopoulos, N., Diederichs, M.S. (2016). Revisiting support optimization at the Driskos tunnel using a quantitative risk approach, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 8:147-163.

Σκοπός της **γεωτεχνικής έρευνας** είναι η πρόγνωση των **γεωτεχνικών συνθηκών** που θα συναντηθούν κατά τη **διάνοιξη της σήραγγας** (και γενικότερα κατά την κατασκευή οποιουδήποτε γεωτεχνικού έργου).

Η μελέτη του έργου θα στηριχθεί στις συνθήκες αυτές για:

- την επιλογή της μεθόδου όρυξης (διάνοιξης),
- τη διαστασιολόγηση των μέτρων υποστήριξης,
- (την εκτίμηση του μεγέθους των υπερεκσκαφών)

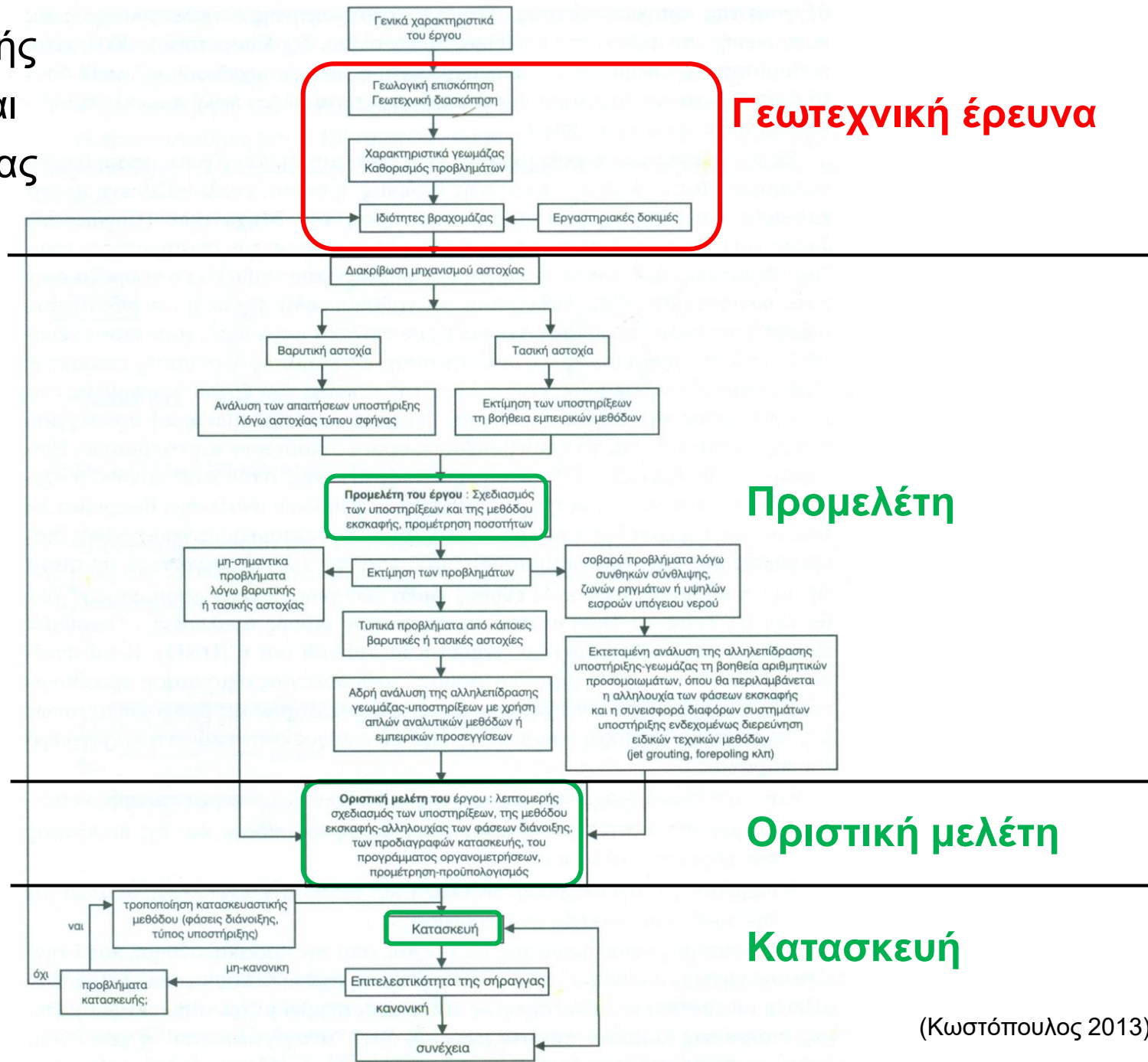
Από την **ορθή (προ)εκτίμηση των γεωτεχνικών συνθηκών**, δηλαδή από τη **σωστή γεωτεχνική διερεύνηση** θα εξαρτηθεί η **επιτυχία του έργου!**

Υπενθύμιση (προκλήσεων)...

1. Τα γεω-υλικά (εδάφη και βράχια) υλικά είμαστε υποχρεωμένοι να τα **χρησιμοποιήσουμε ως έχουν από τη φύση**, όπου μάλιστα συναντώνται σε άπειρες μορφές και με μεγάλη χωρική μεταβλητότητα (ακόμα και στα πλαίσια ενός συγκεκριμένου έργου).
2. Γεω-υλικά: **ανομοιογενή, μεταβλητής σύνθεσης, με πολύπλοκη μηχανική συμπεριφορά** (λόγω φυσικής γένεσης)
3. Η γεωτεχνική έρευνα (γεωτρήσεις, δειγματοληψία, εργαστήριο, κ.λπ.) δεν παρέχει παρά **ενδεικτικές πληροφορίες** και ενδεικτική περιγραφή των σχηματισμών. Επομένως, η γεωτεχνική μηχανική συμπεριλαμβάνει **μεγάλο βαθμό αβεβαιότητας!**
4. Η συμπεριφορά ενός σχηματισμού συχνά καθορίζεται από τις **«ατέλειες»** του (“defects”), οι οποίες καμιά φορά είτε δεν διακρίνονται είτε χάνονται μέσα στο πλήθος των πληροφοριών

Στάδια Γεωτεχνικής Έρευνας

Διάγραμμα ροής σχεδιασμού και κατασκευής μιας σήραγγας



Στάδια γεωτεχνικής έρευνας

Για όλα τα έργα (όχι μόνο σήραγγες):

- **Μελέτη γραφείου** (desk study) – συλλογή και αξιολόγηση διαθέσιμων προκαταρκτικών πληροφοριών
Γεωλογικοί χάρτες, αεροφωτογραφίες, παλαιότερες γεωλογικές ή γεωτεχνικές μελέτες, τοπογραφικοί χάρτες, στοιχεία παλαιότερων γεωτρήσεων, κ.λπ.
- **Αναγνώριση - επιθεώρηση (επί τόπου) περιοχής έργου**
Μεταξύ άλλων, παρατήρηση και καταγραφή γειτονικών κατασκευών (αν υπάρχουν) – το είδος τους ενδέχεται να επηρεάσει το πρόγραμμα των γεωτεχνικών ερευνών (αποφυγή διαταραχής).
- **Έρευνα πεδίου** (site investigation)
 - Σχεδιασμός και **εκτέλεση γεωτρήσεων** ή/και δοκιμαστικών εκσκαφών.
 - Προσδιορισμός στοιχείων ενδεικτικών της στρωματογραφίας.
 - **Εκτέλεση επί τόπου δοκιμών** (άμεσος ή έμμεσος – μέσω εμπειρικών σχέσεων – προσδιορισμός φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων εδάφους, προσδιορισμός στάθμης υπογείου υδάτινου ορίζοντα)
 - **Δειγματοληψία** για εκτέλεση εργαστηριακών δοκιμών.

- **Εργαστηριακή έρευνα** (laboratory investigation)

Εκτέλεση εργαστηριακών δοκιμών για άμεσο προσδιορισμό φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών γεωμάζας.

- Οργανομετρήσεις – παρακολούθηση (monitoring)

Εγκατάσταση ειδικών οργάνων παρακολούθησης κατά τη διάρκεια κατασκευής ή/και λειτουργίας του έργου (για πολύπλοκα και κρίσιμα έργα).

Παρατηρήσεις

- Ανάλογα με την πολυπλοκότητα του έργου, η γεωτεχνική έρευνα μπορεί να αποτελέσει ένα σύνθετο οικονομοτεχνικό πρόβλημα.
- Ιδιαίτερα σε έργα υποδομής, ο προγραμματισμός της γεωτεχνικής έρευνας δεν είναι άκαμπτος, αλλά δίνει τη δυνατότητα τροποποίησης ορισμένων φάσεων με βάση ευρήματα προηγούμενων (φάσεων).
- Αν οι συνθήκες κατά τη διάρκεια κατασκευής του έργου το υπαγορεύουν, μπορεί να πραγματοποιηθούν επιπλέον έρευνες οι οποίες δεν προβλέπονταν αρχικά.
- Βάση για τον σχεδιασμό μιας γεωτεχνικής διερεύνησης αποτελεί η γνώση του τι αναζητείται από αυτή.

Γεωτεχνική έρευνα σε έργα σηράγγων

Σε έργα σηράγγων, η γεωτεχνική έρευνα αρχίζει από την απλή αναγνώριση της περιοχής και γίνεται όλο και λεπτομερέστερη με την προχώρηση του σταδίου της μελέτης του έργου

Στάδια απόκτησης γεωτεχνικών πληροφοριών στη σηραγγοποιία

(κατά ΟΜΟΕ)

1^ο στάδιο: Αναγνωριστική Μελέτη

- προσδιορισμός διαδρόμων
- μελέτη γραφείου
- αναγνώριση πεδίου
- **προκαταρκτική έρευνα υπεδάφους** (αν είναι απαραίτητο)

2° Στάδιο: Προμελέτη - Προκαταρκτική μελέτη

- κύρια έρευνα υπεδάφους επί τόπου
- κύρια έρευνα υπεδάφους στο εργαστήριο
- αξιολόγηση κύριων ευρημάτων έρευνας υπεδάφους

3° Στάδιο: Οριστική μελέτη

- συμπληρωματική έρευνα υπεδάφους (αν είναι απαραίτητο)
- αξιολόγηση ευρημάτων συμπληρωματικής έρευνας υπεδάφους (αν έχει πραγματοποιηθεί)
- επιλογή τιμών παραμέτρων γεωτεχνικού σχεδιασμού
- προετοιμασία έκθεσης γεωτεχνικών συνθηκών αναφοράς (RGCR)

4° Στάδιο: Κατασκευή του έργου

- αναθεώρηση κατά τη διάρκεια της κατασκευής

Παρατηρήσεις (Σοφιανός 2018):

- Κατά τη γεωτεχνική έρευνα σε έργα σιράγγων δίνεται έμφαση στην ανάγκη να λαμβάνονται **αποφάσεις κατά τη διάρκεια της διαδικασίας**. Δηλαδή, κατά τη διάρκεια λήψης των πληροφοριών της έρευνας σε διάφορα στάδια, η στρατηγική μπορεί να αλλάξει και το πρόγραμμα να μεταβληθεί κατάλληλα.
- Αριθμός γεωτρήσεων = f (προβλήματα προς διερεύνηση)
Σε κάθε περίπτωση, λόγω συνήθως μεγάλου μήκους του έργου, δεν είναι δυνατή η πλήρης διερεύνηση των γεωτεχνικών συνθηκών με γεωτρήσεις. Άρα, η **έρευνα** πρέπει να είναι **στοχευμένη** και με **συγκεκριμένους σκοπούς** (και όχι «έρευνα για την έρευνα»).
- Γεωτρήσεις προηγούμενης φάσης μπορούν για οικονομικούς λόγους να εξυπηρετήσουν και σκοπούς επόμενης φάσης, π.χ. για εγκατάσταση πιεζομέτρων.

- **Πρόγραμμα γεωτεχνικής έρευνας → εκτελείται σε φάσεις**
Τα συμπεράσματα μιας **προκαταρκτικής έρευνας** επιτρέπουν στην **κύρια έρευνα** να προσαρμοστεί καλύτερα στις αναμενόμενες συνθήκες, ενώ μια **συμπληρωματική διερεύνηση** μπορεί να προγραμματιστεί λόγω αμφιβολιών και κενών γνώσης που παρέμειναν μετά από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της κύριας διερεύνησης.
- Κάθε συνδυασμός έργου και περιοχής είναι μοναδικός. **Δεν υπάρχει σύνολο κανόνων που μπορεί να εφαρμοστεί απαρέγκλιτα σε κάθε περίπτωση.**
- Απαιτείται συναξιολόγηση γεωλογίας με αποτελέσματα γεωτεχνικών ερευνών (εκ των οποίων ουκ άνευ η αγαστή **συνεργασία τεχνικού γεωλόγου – γεωτεχνικού μηχανικού**).

- Απαιτείται **στενή συνεργασία Μελετητή και Κατασκευαστή** στα αρχικά στάδια του σχεδιασμού της σήραγγας για την **αξιολόγηση ερευνών και δοκιμαστικών διατρήσεων σε πραγματικές συνθήκες κατασκευής** και την εξαγωγή συμπερασμάτων χρήσιμων για τις αναλυτικές προσεγγίσεις. *(Λέφας et al. 2001)*
- Λόγω σημαντικής **μεταβλητότητας** των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών των γεωυλικών η μέθοδος της **στοχαστικής προσομοίωσης** των τιμών των παραμέτρων βοηθά στην επιλογή παραμέτρων με επιθυμητό βαθμό εμπιστοσύνης. *(Λέφας et al. 2001)*

Αιτίες εσφαλμένης εκτίμησης συνθηκών υπεδάφους

Υπό την παραδοχή σωστού προγραμματισμού και εκτέλεσης γεωτεχνικών ερευνών, μια σειρά άλλων παραμέτρων μπορεί να επηρεάσει τη σωστή εκτίμηση των επί τόπου γεωτεχνικών συνθηκών:

- Επίδραση **διαταραχής εδαφικών δειγμάτων** στις εργαστηριακές δοκιμές ή ύπαρξη **σημαντικών διαφορών μεταξύ επί τόπου και εργαστηριακών δοκιμών**.
- **Εσφαλμένη ερμηνεία** αποτελεσμάτων δοκιμών (που οδηγεί σε εσφαλμένη εκτίμηση γεωτεχνικών συνθηκών).
- **Ανεπαρκής συνεργασία** μεταξύ των φορέων **μελέτης και κατασκευής** του έργου (→ αδυναμία επισήμανσης σημαντικών αποκλίσεων των συνθηκών ή μεθόδων κατασκευής σε σχέση με τις συνθήκες που είχαν προβλεφθεί ή προδιαγραφεί από τον μελετητή).

**Κόστος, αβεβαιότητα και
γεωτεχνικές έρευνες**

Κόστος, αβεβαιότητα και γεωτεχνικές έρευνες

Το **κόστος** κατασκευής μιας σήραγγας αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για αυτό που ονομάζεται **επιτυχής ολοκλήρωση του έργου**.

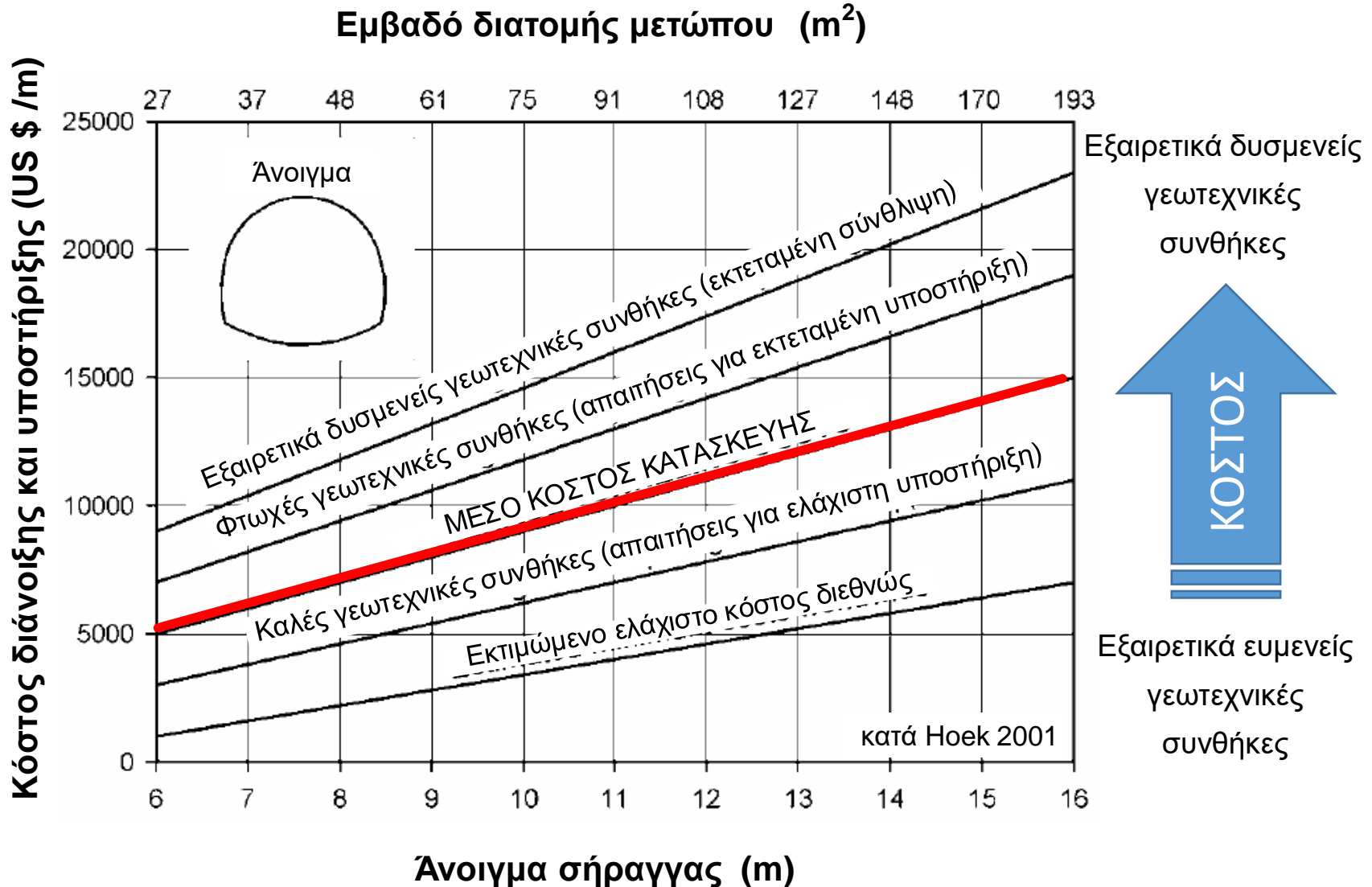
Παρατηρήσεις:

- Συχνά επανεξετάζεται και τροποποιείται κατά την κατασκευή.
- Διαφέρει από έργο σε έργο.
- Διεθνές φαινόμενο η υπέρβαση του αρχικά εκτιμώμενου κόστους.

US National Committee on Tunnelling Technology (1984):

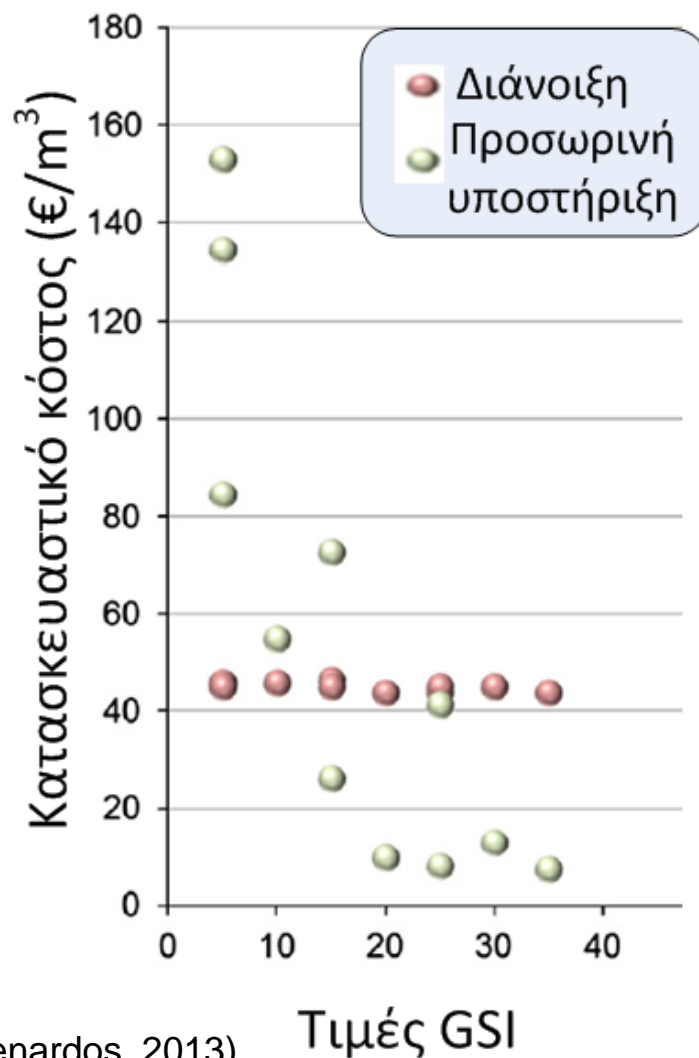
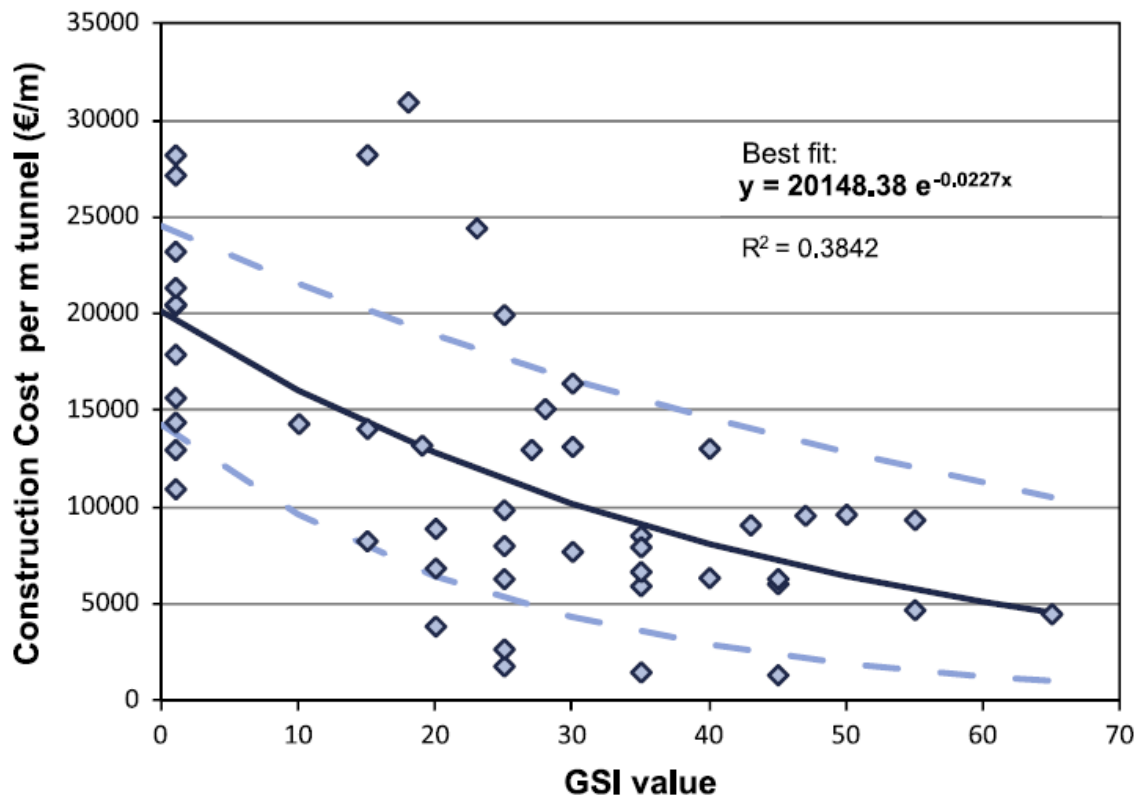
- ✓ *Σχεδόν το 60% κατασκευασμένων σηράγγων, κατέληξαν σε υπέρβαση του κόστους και «διαμάχες» μεταξύ του κατασκευαστή και του κύριου του έργου.*
- ✓ *Το τελικό κόστος (συμπεριλαμβανομένων των αξιώσεων εκ μέρους του εργολάβου) έφθανε ως και 50% πάνω από τον αρχικό προϋπολογισμό του έργου.*

Κόστος → συνάρτηση πολλών παραμέτρων, μεταξύ των οποίων κρίσιμο ρόλο έχουν οι **γεωλογικές & γεωτεχνικές συνθήκες έργου!**



Π.χ. στις σήραγγες Εγνατίας Οδού, με συνολικό μέσο κόστος πλήρως κατασκευασμένου κλάδου σήραγγας 17000 €/m, το 62% του κόστους αφορούσε θέματα εκσκαφής και προσωρινής υποστήριξης!

Κόστος κατασκευής ελληνικών σηράγγων - εκσκαφή και προσωρινή υποστήριξη (τιμές 2011):



(Paraskevopoulou and Benardos, 2013)

Η σηραγγοποιία (σχεδιασμός + κατασκευή σηράγγων) ως δραστηριότητα ενέχει μεγάλη αβεβαιότητα και εγκυμονεί πολλούς κινδύνους!

Βασικοί κίνδυνοι στη σηραγγοποιία*:

- **Γεωτεχνική αβεβαιότητα και διακινδύνευση**
- Ανεπαρκής σχεδιασμός έργου
- Φτωχός προγραμματισμός έργου
- Ανεπαρκείς ή φτωχές κατασκευαστικές πρακτικές
- Άλλοι («υπόγειοι») κίνδυνοι

* Manzari M. (2015). Soft Ground Site Investigation & Managing Geotechnical Risks In Tunnelling. *In*: Challenges and Innovations in Tunnelling, Tunnelling Association of Canada, Octo 4-6 2015, Kingston, ON Canada.

Κατά ΕΛΟΤ (και ISO):

Αβεβαιότητα (uncertainty): κατάσταση μερικής τουλάχιστον έλλειψης πληροφόρησης και γνώσης για μελλοντικά συμβάντα, της πιθανότητας εμφάνισης και των συνεπειών τους.

Διακινδύνευση (risk): η αρνητική ή θετική επίδραση της αβεβαιότητας στην επίτευξη των στόχων.

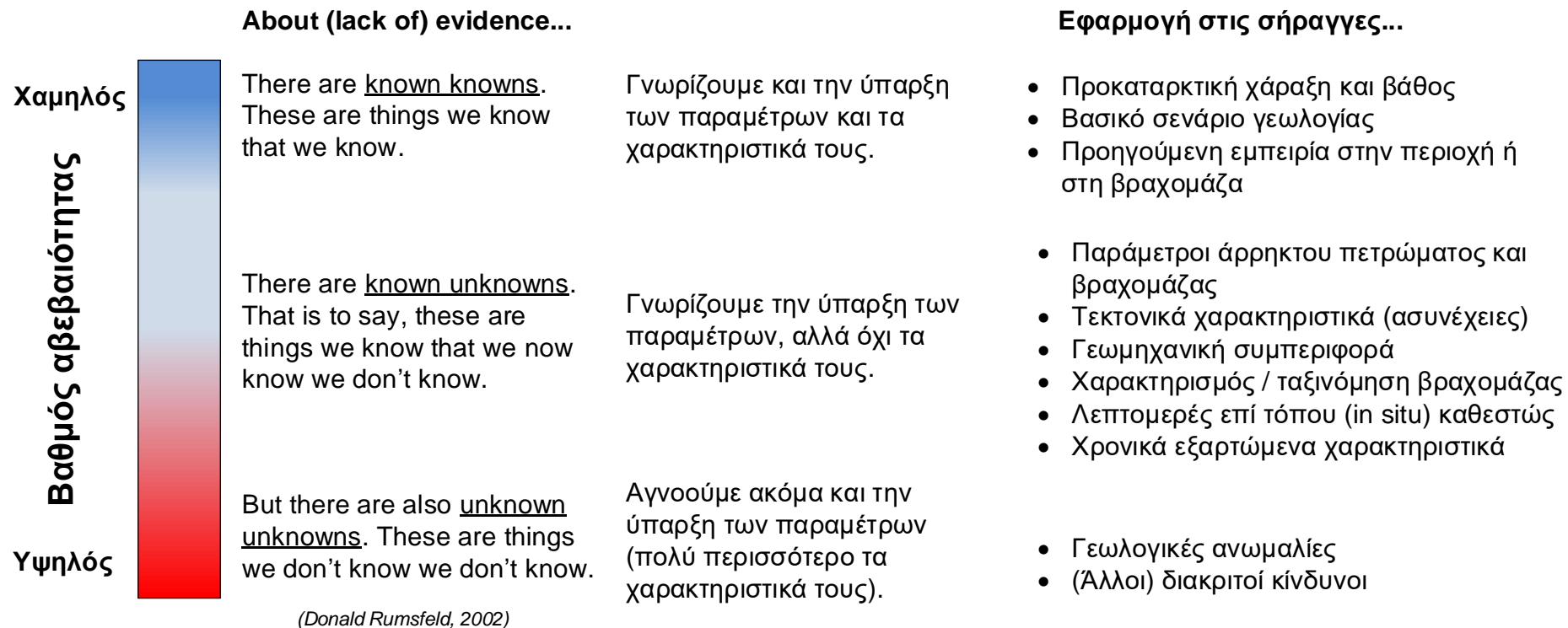
"There are known knowns" ...



Reports that say that something hasn't happened are always interesting to me, because as we know, there are known knowns; there are things we know we know. We also know there are known unknowns; that is to say we know there are some things we do not know. But there are also unknown unknowns—the ones we don't know we don't know. And if one looks throughout the history of our country and other free countries, it is the latter category that tends to be the difficult ones.

Φράση από απάντηση που έδωσε ο υπ. Άμυνας των ΗΠΑ, Donald Rumsfeld, σε ερώτηση (κατά τη διάρκεια συνέντευξης τύπου στις 12/02/2002) σχετικά με την έλλειψη αποδεικτικών στοιχείων (lack of evidence) που να συνέδεαν την κυβέρνηση του Ιράκ με την προμήθεια όπλων μαζικής καταστροφής σε τρομοκρατικές οργανώσεις. Είχε προηγηθεί η επίθεση στους Δίδυμους Πύργους στις 11/09/2001. Η εισβολή στο Ιράκ ξεκίνησε στις 19/03/2003.

Κατηγορίες αβεβαιοτήτων στον σχεδιασμό (γενικά) και αντίστοιχες συνιστώσες γεωτεχνικού σχεδιασμού σηράγγων.



Γεωτεχνική αβεβαιότητα

... στη «μικρή» κλίμακα (π.χ. ανά γεώτρηση) (κατά μήκος χάραξης Γραμμής 4: Φάρος Ψυχικού – Μαρούσι)

Βάθος (m)	Περιγραφές στρωμάτων
0 – 0.60	Αμμώδης ΑΡΓΙΛΟΣ , καστανοκόκκινου χρώματος
0.60 – 1.50	Ιλυώδης / αργιλώδης ΑΜΜΟΣ , με λίγα χαλίκια, ανοιχτού καστανοπράσινου χρώματος
1.50 – 3.30	Ιλυώδεις ΧΑΛΙΚΕΣ με άμμο (GM) χωρίς πλαστικότητα, ανοιχτού καστανοπράσινου χρώματος (αποσαθρωμένος αργιλόλιθος)
3.30 – 9.70	ΑΡΓΙΛΟΛΙΘΟΣ , καστανοπράσινου έως πρασινωπού χρώματος, κερματισμένος, οξειδωμένος, τοπικά αποσυντίθεται σε χάλικες και λατύπες. Βραχώδες υλικό.
9.70 – 21.20	Ασβεστιτικός ΑΡΓΙΛΟΛΙΘΟΣ , γκριζοπράσινου χρώματος, με εδαφοποιημένες ζώνες από ιλυώδη ΑΜΜΟ με χαλίκια (SM) χωρίς πλαστικότητα μετά το βάθος 15.50 μ (15.50-16.20, 16.60, 18.50, 19.00, 19.40 μ). Λείες επιφάνειες ασυνεχειών. Βραχώδες υλικό.
21.20 – 28.10 (τέλος γεώτρησης)	Ασβεστιτικός ΑΡΓΙΛΟΛΙΘΟΣ , γκριζοπράσινου χρώματος, κατακερματισμένος, με εδαφοποιημένες ζώνες. Αποσυντίθεται σε ΑΜΜΟ κακής διαβαθμίσης με ιλύ και χαλίκια, ΧΑΛΙΚΕΣ καλής διαβάθμησης με άργιλο και άμμο έως ιλυώδη ΑΜΜΟ με χαλίκια (SP-SM) (GW-GC) (SM) χωρίς πλαστικότητα έως μέσης πλαστικότητας. Μικτό υλικό (βραχώδες – εδαφικό).

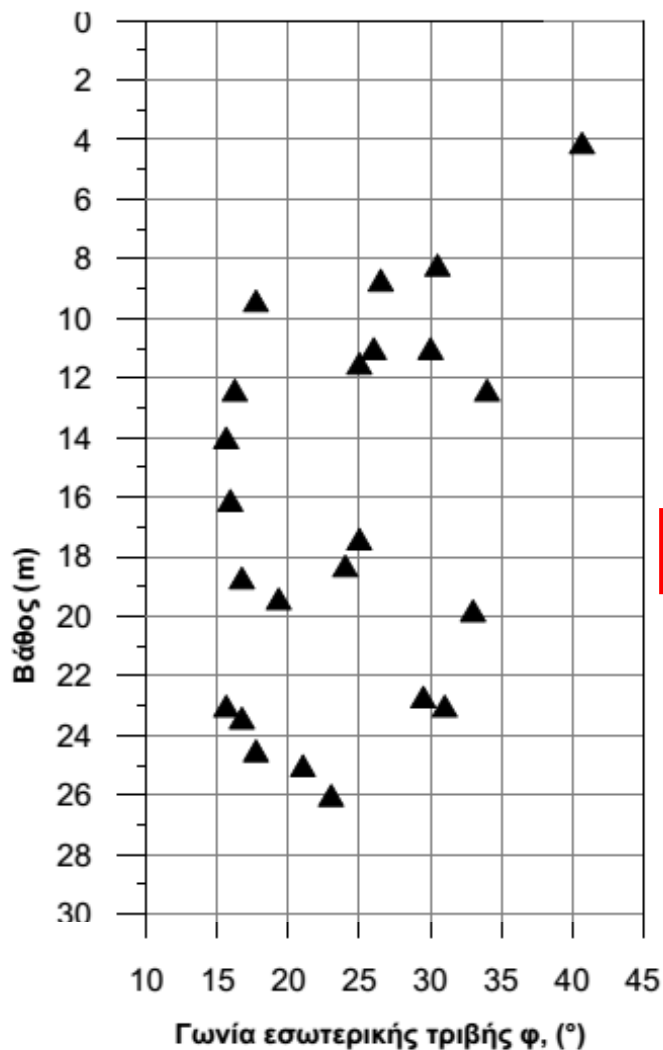
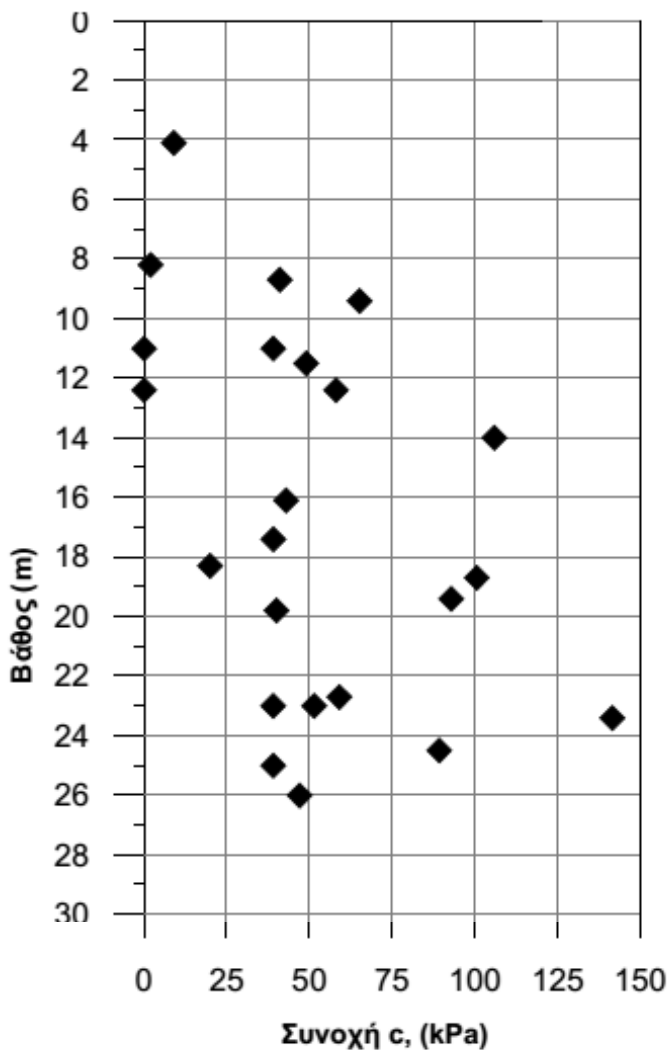
Δοκιμές βραχομηχανικής στο βραχώδες υλικό (3.30 – 21.20 m)



Βάθος (m)		Μονοαξονική θλίψη		Σημειακή φόρτιση	
από	έως	σ_c (MPa)	E (MPa)	$I_{s50//}$ (MPa)	$I_{s50\perp}$ (MPa)
5.00	5.20			0.19	0.39
6.20	6.50			0.20	0.25
9.00	9.40	5.39	567.64	0.24	0.20
10.20	10.50	4.83	1065.30		
13.00	13.20	5.46	1033.88		
13.60	13.90			0.23	0.20
19.50	19.60			0.21	0.27
Μέση τιμή		5.23	888.94	0.21	0.26
Τυπ. απόκλιση		0.35	278.70	0.02	0.04
Συντ. μεταβλητότητας		7%	31%	9%	14%

αβεβαιότητα

... σε μεγαλύτερη κλίμακα (π.χ. ανά γεωτεχνική ενότητα, ως αποτέλεσμα πολλών γεωτρήσεων) (κατά μήκος χάραξης Γραμμής 4: Φάρος Ψυχικού – Μαρούσι)



	c (kPa)	φ (°)
n	23	23
min	0.0	15.6
max	141.5	40.7
μ	50.9	23.9
σ	35.9	7.1
COV	70.5 %	29.7 %

αβεβαιότητα

COV: coefficient of variation (συντελεστής μεταβλητότητας)

Εύρη συντελεστών μεταβλητότητας COVs (%) για διάφορες γεωτεχνικές παραμέτρους (Lacasse and Nadim 1996)

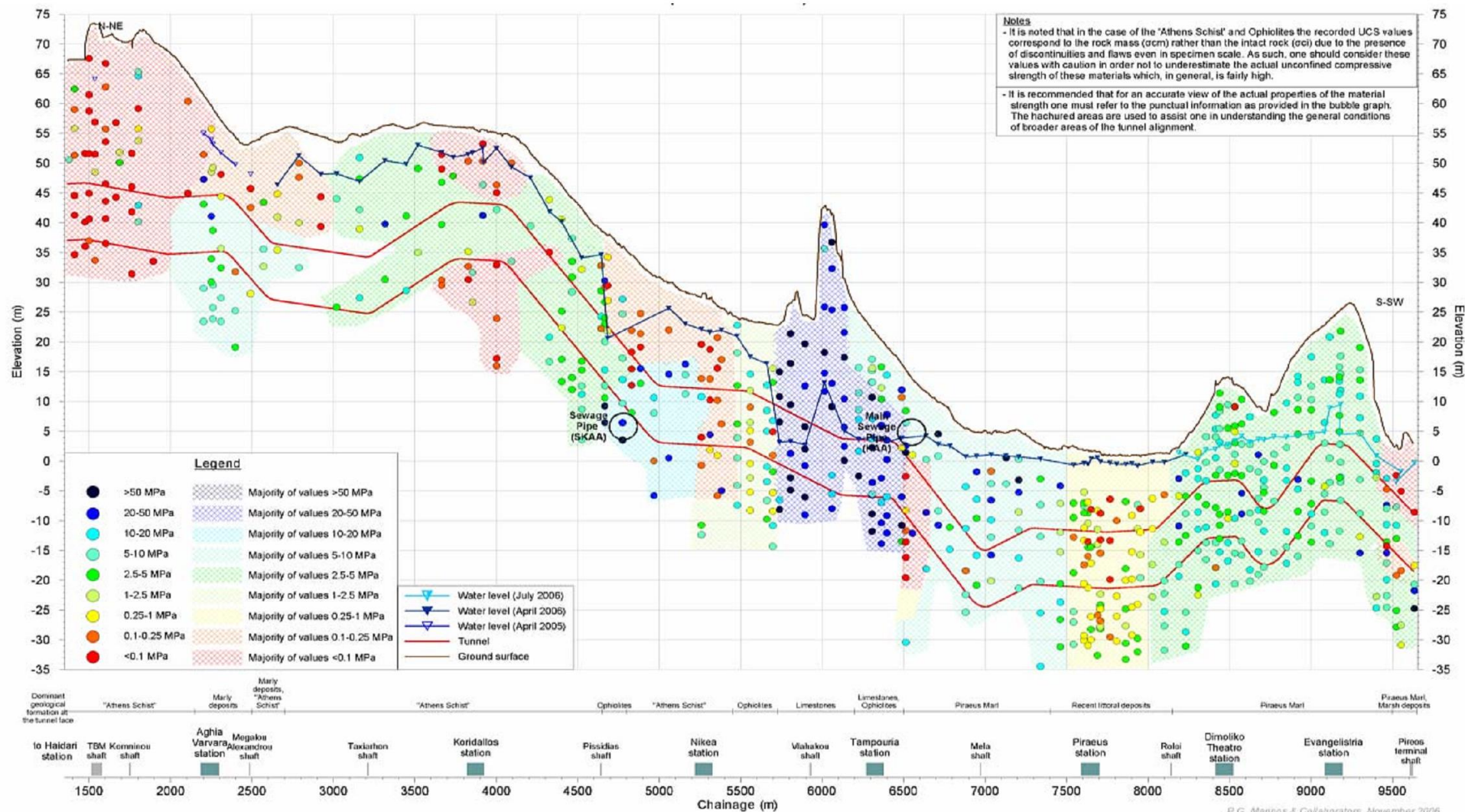
Εδαφική ιδιότητα	Τύπος εδάφους	Εύρος
Αστράγγιστη διατμητική αντοχή	Άργιλος (τριαξονική)	5 - 20
Αστράγγιστη διατμητική αντοχή	Άργιλος (δείκτης S_u)	10 - 35
Αστράγγιστη διατμητική αντοχή	Αργιλώδεις ιλύες	10 - 30
Λόγος S_u/σ'_{vo}	Άργιλος	5 - 15
Όριο πλασιμότητας	Άργιλος	3 - 20
Όριο υδαρότητας	Άργιλος	3 - 20
Φαινόμενο βάρος υπό άνωση	Όλα	0 - 10
Γωνία τριβής	Άμμος	2 - 5
Λόγος κενών, πορώδες	Όλα	7 - 30
Βαθμός υπερστερεοποίησης	Άργιλος	10 - 35

Εύρη και τυπικές τιμές συντελεστών μεταβλητότητας COVs (%) για βασικές γεωτεχνικές παραμέτρους (Orr and Breysse 2008)

Παράμετρος	Τυπικό εύρος τιμών	Προτεινόμενη τιμή ελλείψει εργαστηριακών δεδομένων
Εφαπτομένη γωνίας τριβής $\tan\phi'$	5 - 15	10
Συνοχή c'	20 - 40	40
Αστράγγιστη διατμητική αντοχή c_u	20 - 40	30
Συντελεστής συμπιεστότητας m_v	20 - 40	40
Ειδικό βάρος γ	1 - 10	0

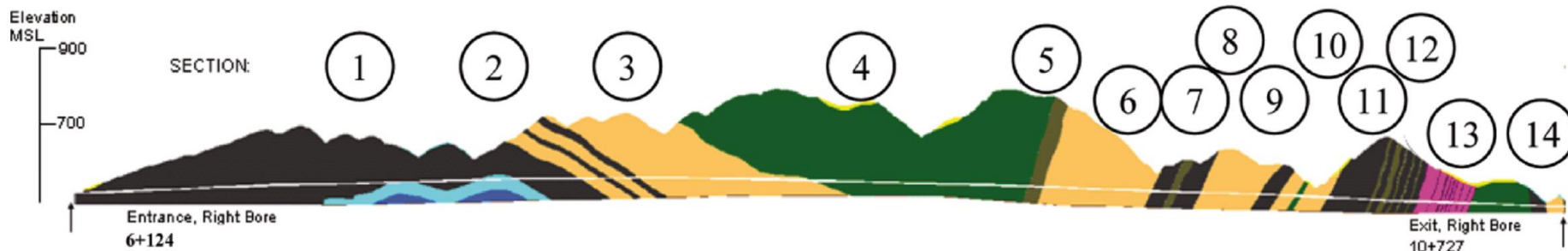
... αβεβαιότητα στη μεγάλη κλίμακα (χάραξη)

Π.χ. μεταβολή αντοχής σε μονοαξονική θλίψη κατά μήκος της χάραξης των επεκτάσεων του μετρό των Αθηνών προς Πειραιά



P.G. Maniatis & Collaborators, November 2006

Π.χ. μεταβολή λιθολογικών ενοτήτων και μηχανικών χαρακτηριστικών στη σήραγγα Δρίσκου (Εγνατία Οδός)



Chainage	6+124	6+248	7+625	7+840	8+385	9+035	9+085	9+425	9+580	9+975	10+106	10+260	10+420	10+610	10+727
Silt(Si)- Sand(Sa)- Stone			Sisa	SaSi/ Sisa	SaSi	Sisa/ Si+SaSi	Sa-AN	SaSi	Sa+SiSa	SaSi/SiSa+Si	SiSa	Sa+SiSa	Fa/SiSa	Si/SiSa	SaSi/Sa+SiSa
GSI average	35-40		35-50	40~50	50-65	30-35	60~65	50-60	45~60	45-65	45-50	25~50	35-45	25~50	45~50
Rock- mass Elastic Modulus E (GPa)	HCC = 1.3 - 1.8 HD = 0.4 - 0.6	*Hoek, Carranza-Torres & Corkum 2002 *HCC = 2.1 - 5.5 **HD = 1.1 - 3.5 ** Hoek & Diederichs 2006 (MR=400)		HCC = 3.1 - 6.7 HD = 1.9 - 5.5	HCC = 6.7 - 18 HD = 5.9 - 16	HCC = 1 - 2.3 HD = 0.33 - 1.4	HCC = 9.7 - 15 HD = 5.9 - 9.5	HCC = 6.7 - 14 HD = 5.9 - 13	HCC = 4.1 - 11 HD = 2.5 - 7.8	HCC = 3.3 - 15 HD = 1.8 - 10	HCC = 4.1 - 5.5 HD = 2.5 - 3.5	HCC = 0.75 - 5.5 HD = 0.23 - 3.5	HCC = 1.6 - 3.8 HD = 0.64 - 2.1	HCC = 0.67 - 3.9 HD = 0.2 - 1.8	HCC = 4.7 - 6.7 HD = 3.6 - 5.5
Mi (est)	10		10	12	14	11	12	10	15	12	14	15	14	10	13
Strength (MPa) UCS = intact RM = rockmass	UCS = 10 RM = 0.9 - 1.1	UCS = 25 - 30 RM = 2.4 - 4.7 *Hoek, Carranza-Torres & Corkum 2002		UCS = 30 - 45 RM = 3.1 - 6.7	UCS = 45-60 RM = 6.3 - 14.7	UCS = 10 - 30 RM = 0.7 - 2.5	UCS = 30 - 40 RM = 6.4 - 10.2	UCS = 45-60 RM = 6.3 - 12.2	UCS = 30 - 40 RM = 4.1 - 9.1	UCS = 20-40 RM = 2.3-9.8	UCS = 30 RM = 4-4.7	UCS = 10-30 RM = 0.7-4.9	UCS = 15 - 25 RM = 1.4 - 3.2	UCS = 8-15 RM = 0.4-2.1	UCS = 40-45 RM = 5.2-6.9

Πηγές γεωτεχνικής αβεβαιότητας και διακινδύνευσης:

- Εγγενής πολυπλοκότητα, ετερογένεια και χωρική μεταβλητότητα του γεωλογικού μέσου (εδαφικού, βραχώδους ή μικτού) και περιβάλλοντος
- Αβεβαιότητα στις δοκιμές (επί τόπου και εργαστηριακές)
- Αβεβαιότητα στις εκτιμήσεις (του μηχανικού, του γεωλόγου)
- Τα κάθε λογής προσομοιώματα (τεχνικογεωλογικά – γεωτεχνικά, φυσικά – εργαστηριακά, αναλυτικά ή αριθμητικά, κ.λπ.) είναι αδρομερείς αναπαραστάσεις του φυσικού περιβάλλοντος.

Βασικός σκοπός της γεωτεχνικής διερεύνησης είναι η **κατανόηση της συμπεριφοράς του γεω-υλικού**, ώστε:

- Ο μελετητής να εκτιμήσει σωστά τα φορτία και την απόκριση του γεωυλικού και να προτείνει ασφαλή και οικονομικό σχεδιασμό.
- Ο κατασκευαστής να εκτιμήσει τη βέλτιστη μέθοδο κατασκευής, τον απαιτούμενο απαραίτητο εξοπλισμό, και φυσικά το κόστος και τον χρονικό προγραμματισμό του έργου.
- Ο κύριος του έργου να εκτιμήσει τον αρχικό προϋπολογισμό, τα εκτιμώμενα κόστη, και τον χρονικό προγραμματισμό.

Στις σήραγγες δεν είναι αρκετό να περιγράφεται απλώς η στρωματογραφία και η στάθμη του υπόγειου υδάτινου ορίζοντα!

Η **αποτελεσματικότητα** της γεωτεχνικής διερεύνησης εξαρτάται από:

- την **κλίμακα (εύρος) της διερεύνησης,**
- την **ποιότητα της διερεύνησης,** και
- τη **σωστή εκτίμηση** των αποτελεσμάτων της διερεύνησης

Συνήθως, η γεωτεχνική αβεβαιότητα είναι αντιστρόφως ανάλογη των παραπάνω παραμέτρων!

Υπάρχει διεθνώς αποδεκτή συσχέτιση μεταξύ κλίμακας (εύρους) διερεύνησης και διακινδύνευσης (ρίσκου); **ΌΧΙ!**

- Διαφορετικά γεωλογικά υπόβαθρα → διαφορετική αβεβαιότητα και μεταβλητότητα εδαφικών / βραχωδών σχηματισμών
- Η διακινδύνευση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό και από την κατασκευαστική μέθοδο (π.χ. διάνοιξη με συμβατικά μέσα vs. εκμηχανισμένης διάνοιξης).

Κόστος γεωτεχνικών ερευνών

Κανονισμός Προεκτιμώμενων Αμοιβών μελετών και παροχής τεχνικών και λοιπών συναφών επιστημονικών υπηρεσιών (ΦΕΚ 2519/2017)

ΤΜΗΜΑ Α΄: ΓΕΝΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

ΤΜΗΜΑ Β΄: ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΜΕΛΕΤΩΝ

ΚΕΦ. Α΄ : ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΕΣ, ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΚΕΣ, ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΙΚΕΣ, ΚΤΗΜΑΤΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ

ΚΕΦ. Β΄ : ΜΕΛΕΤΕΣ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ (ΟΔΙΚΩΝ & ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΩΝ)

ΚΕΦ. Γ΄ : ΜΕΛΕΤΕΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

ΚΕΦ. Δ΄ : ΜΕΛΕΤΕΣ ΛΙΜΕΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

ΚΕΦ. Ε΄ : ΜΕΛΕΤΕΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

ΚΕΦ. ΣΤ΄ : ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ

ΚΕΦ. Ζ΄ : ΑΜΟΙΒΕΣ ΜΕΛΕΤΩΝ ΚΤΙΡΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ (ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΩΝ, ΣΤΑΤΙΚΩΝ, Η/Μ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ) ΚΑΙ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΕΛΕΥΘΕΡΩΝ ΧΩΡΩΝ

ΚΕΦ. Η΄ : ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ-ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ-ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΕΡΕΥΝΕΣ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΕΣ

ΚΕΦ. Θ΄ : ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΥΠΑΙΘΡΟΥ – ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

ΚΕΦ. Ι΄ : ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ Η' :

ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ-ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ-ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΕΡΕΥΝΕΣ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΕΣ

Πεδίο Εφαρμογής

Άρθρο	ΓΛΕ.1	Γεωλογικές χαρτογραφήσεις
Άρθρο	ΓΛΕ.2	Γεωλογικές μηκοτομές
Άρθρο	ΓΛΕ.3	Γεωλογικές τομές και δατομές
Άρθρο	ΓΛΕ.4	Ειδικοί και βοηθητικοί θεματικοί χάρτες
Άρθρο	ΓΛΕ.5	Γεωλογική αποτύπωση ανοικτής εκσκαφής
Άρθρο	ΓΛΕ.6	Γεωλογική χαρτογράφηση υπογείων έργων και σπηλαίων
Άρθρο	ΓΛΕ.7	Προσδιορισμός ποιότητας πετρώματος
Άρθρο	ΓΛΕ.8	Τεκτονικά διαγράμματα – Δυνητικές ολισθήσεις
Άρθρο	ΓΛΕ.9	Ταξινομήσεις βραχομάζας
Άρθρο	ΓΛΕ.10	Καταγραφές σημείων εμφάνισης νερού και γεωερευνητικών εργασιών
Άρθρο	ΓΛΕ.11	Μετρήσεις σημείων εμφάνισης νερού και γεωερευνητικών εργασιών
Άρθρο	ΓΛΕ.12	Καταγραφές υφιστάμενων πρηνών
Άρθρο	ΓΛΕ.13	Δανειοθάλαμοι-Αποθεσιοθάλαμοι-Λατομεία

Άρθρο	ΓΛΕ.14	Πετρογραφικές αναλύσεις
Άρθρο	ΓΛΕ.15	Ορυκτολογικές αναλύσεις
Άρθρο	ΓΛΕ.16	Σεισμοτεκτονική έρευνα
Άρθρο	ΓΛΕ.17	Τεύχος γεωλογικής μελέτης
Άρθρο	ΓΛΕ.18	Έκθεση κοινής γεωλογικής-γεωτεχνικής αξιολόγησης
Άρθρο	ΓΛΕ.19	Εισκόμιση-αποκόμιση εξοπλισμού γεωφυσικής έρευνας
Άρθρο	ΓΛΕ.20	Μετακίνηση συνεργείου εκτέλεσης γεωφυσικών ερευνών από θέση σε θέση
Άρθρο	ΓΛΕ.21	Εκτέλεση, επεξεργασία και παρουσίαση αποτελεσμάτων γεωφυσικών ερευνών
Άρθρο	ΓΛΕ.22	Τεύχος γεωφυσικής έκθεσης
Άρθρο	ΓΛΕ.23	Μελέτες γεωλογικής καταλληλότητας σε περιοχές προς πολεοδόμηση
Άρθρο	ΓΛΕ.24	Υδρογεωτεχνικές μελέτες για κοιμητήρια ή παρακείμενες περιοχές
Άρθρο	ΓΛΕ.25	Μελέτες γεωλογικής καταλληλότητας για κοιμητήρια ή παρακείμενες περιοχές
Άρθρο	ΓΛΕ.26	Υδρογεωλογικές έρευνες και μελέτες - Γενικά

Άρθρο	ΓΛΕ.27	Γεωλογικές χαρτογραφήσεις
Άρθρο	ΓΛΕ.28	Υδρογεωλογικές τομές
Άρθρο	ΓΛΕ.29	Βοηθητικοί – Θεματικοί χάρτες
Άρθρο	ΓΛΕ.30	Απογραφή σημείων εμφάνισης νερού
Άρθρο	ΓΛΕ.31	Μετρήσεις στάθμης
Άρθρο	ΓΛΕ.32	Μετρήσεις παροχής
Άρθρο	ΓΛΕ.33	Προγραμματισμός, εκτέλεση, παρακολούθηση και αξιολόγηση ιχνηθετήσεων
Άρθρο	ΓΛΕ.34	Δειγματοληψία νερού και αποστολή στο εργαστήριο για ανάλυση
Άρθρο	ΓΛΕ.35	Εκτέλεση χημικής ανάλυσης νερού
Άρθρο	ΓΛΕ.36	Εκτέλεση Μικροβιολογικής ανάλυσης νερού
Άρθρο	ΓΛΕ.37	Προσδιορισμοί Ιχνοστοιχείων στο νερό
Άρθρο	ΓΛΕ.38	Ερευνητικές υδρογεωτρήσεις, προγραμματισμός, παρακολούθηση και αξιολόγηση
Άρθρο	ΓΛΕ.39	Δοκιμαστικές αντλήσεις. Προγραμματισμός, παρακολούθηση, επεξεργασία και αξιολόγηση
Άρθρο	ΓΛΕ.40	Ειδικές υδρογεωλογικές εργασίες

Άρθρο	ΓΛΕ.41	Μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης υπόγειων υδροφορέων
Άρθρο	ΓΛΕ.42	Μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης διασποράς ρύπων σε υπόγειο υδροφορέα
Άρθρο	ΓΛΕ.43	Έρευνα-Μελέτη Διαχείρισης υδατικών πόρων. Εκτίμηση προσφοράς υπόγειου υδατικού δυναμικού
Άρθρο	ΓΛΕ.44	Συνθετικός υδρογεωλογικός χάρτης
Άρθρο	ΓΛΕ.45	Υδρολογική ανάλυση στα πλαίσια υδρογεωλογικής μελέτης
Άρθρο	ΓΛΕ.46	Τεύχος Υδρογεωλογικής Μελέτης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ Θ' : **ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΥΠΑΙΘΡΟΥ –**
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

Άρθρο	ΓΤΕ.1	Εργασίες Υπαίθρου
Άρθρο	ΓΤΕ.2	Εργαστηριακές Δοκιμές
Άρθρο	ΓΤΕ.3	Έκθεση Γεωτεχνικής Έρευνας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ Ι' : **ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ**

Πεδίο Εφαρμογής – Προδιαγραφές

Άρθρο	ΓΜΕ.1	Προγραμματισμός, Επίβλεψη, Αξιολόγηση Γεωτεχνικών Ερευνών
Άρθρο	ΓΜΕ.2	Γεωτεχνικές Μελέτες

Παραδείγματα

Άρθρο	Περιγραφή δραστηριότητας	Μονάδα	Βάθη	Τιμή μονάδος (€)
ΓΤΕ.1.5.	Περιστροφικές γεωτρήσεις (με δειγματοληψία) σε σχηματισμούς αργίλων, ιλύος, άμμου, βράχων σκληρότητας μέχρι και 4 MOHS κλπ	μ.μ.	0 – 20 m	180
		μ.μ.	20 – 40 m	203
ΓΤΕ.1.6.	Περιστροφικές γεωτρήσεις (με δειγματοληψία) σε αμμοχάλικα ή κροκάλες και σε βράχους κατακερματισμένους με RQD < 25%	μ.μ.	0 – 20 m	306
		μ.μ.	20 – 40 m	344
ΓΤΕ.1.7.	Περιστροφικές γεωτρήσεις (με δειγματοληψία) σε βράχους σκληρότητας μεγαλύτερης των 4 MOHS	μ.μ.	0 – 20 m	252
		μ.μ.	20 – 40 m	284
ΓΤΕ.1.10.	Ερευνητικές διασκοπήσεις με διατρητικό φορείο (π.χ Wagon Drill)	μ.μ.	-	15
ΓΤΕ.1.11.	Γεωτρήσεις AUGER	μ.μ.	-	54
ΓΤΕ.1.17.	Δειγματοληψία εν ξηρώ (φραγμός) σε γεωτρήσεις του άρθρου ΓΤΕ.1.5	μ.μ.	0 – 20 m	54
		μ.μ.	20 – 40 m	61
ΓΤΕ.1.18.	Δειγματοληψία εν ξηρώ (φραγμός) σε γεωτρήσεις του άρθρου ΓΤΕ.1.6	μ.μ.	0 – 20 m	92
		μ.μ.	20 – 40 m	103

Π.χ. τρεις “σαραντάρες» (βάθους 40 m) περιστροφικές γεωτρήσεις (με δειγματοληψία) σε κατακερματισμένο βράχο (RQD < 25%):

$$3 \times (20\text{m} \times 306 \text{ €/m} + 20\text{m} \times 344 \text{ €/m}) = 3 \times (6120 + 6880) \text{ €} = \mathbf{39000 \text{ €}}$$

+ κόστος εισκόμισης / αποκόμισης (βάσει χιλιομετρικής απόστασης) & μετακίνησης από θέση σε θέση (με την ώρα)

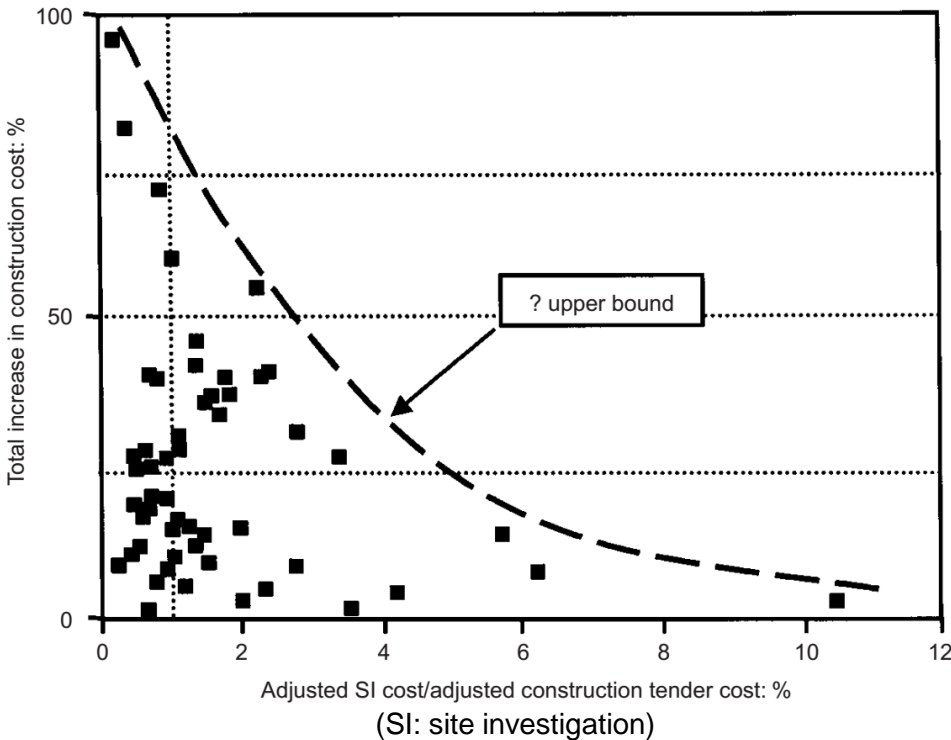
+ νερά (προμήθεια, κατασκευή δικτύου, αντλίες, βυτιοφόρα, κλπ)

+ εργαστηριακές δοκιμές

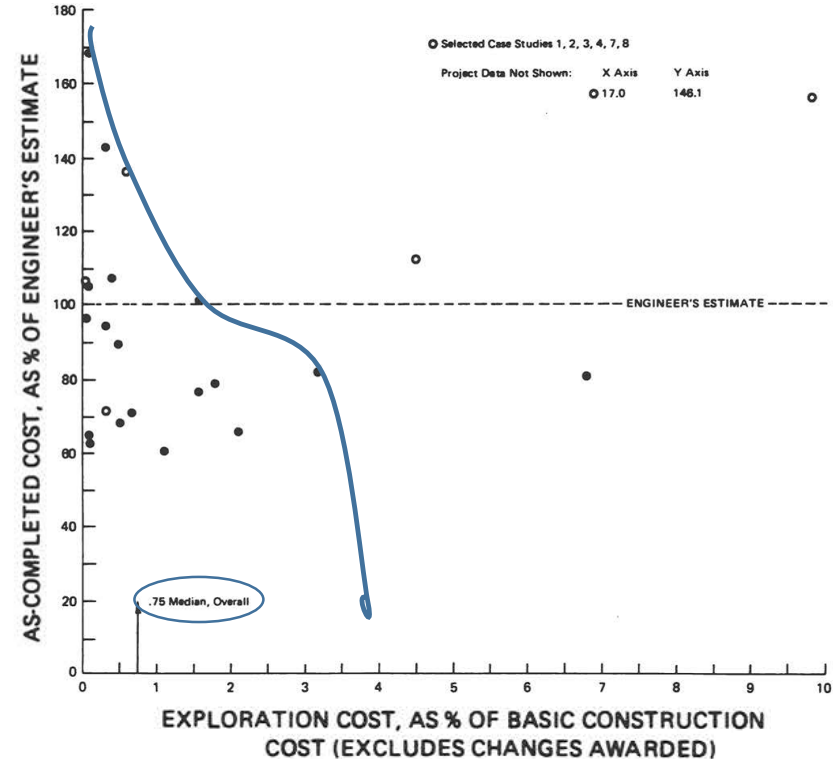
Παραδείγματα

Άρθρο	Περιγραφή δραστηριότητας	Μονάδα	Τιμή μονάδος (€)
ΓΤΕ.2.2	Προσδιορισμός φυσικής υγρασίας εδάφους		10
ΓΤΕ.2.4	Προσδιορισμός ειδικού βάρους εδαφών		32
ΓΤΕ.2.5	Προσδιορισμός ορίου υδαρότητας, ορίου πλαστικότητας και δείκτη πλαστικότητας		39
ΓΤΕ.2.11	Προσδιορισμός σχέσης υγρασίας -πυκνότητας εδαφών πρότυπος ή τροποποιημένη μέθοδος κατά PROCTOR		60
ΓΤΕ.2.13	Δοκιμή μονοδιάστατης στερεοποίησης		115
ΓΤΕ.2.14	Δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης		36
ΓΤΕ.2.15	ΤΧ δοκιμή σε συνεκτικά εδάφη χωρίς στερεοποίηση και μέτρηση πίεσεως πόρων (UU) / σημείο	D = 1 1/2"	46
ΓΤΕ.2.16	ΤΧ δοκιμή με στερεοποίηση πίεσεως πόρων (CUPP) / σημείο	D = 1 1/2"	116
ΓΤΕ.2.17	ΤΧ δοκιμή με στερεοποίηση χωρίς μέτρηση πίεσεως πόρων (CD) / σημείο	D = 1 1/2"	157
		D = 2 1/2"	204

Αλληλεπίδραση κόστους γεωτεχνικής διερεύνησης με κατασκευαστικό κόστος



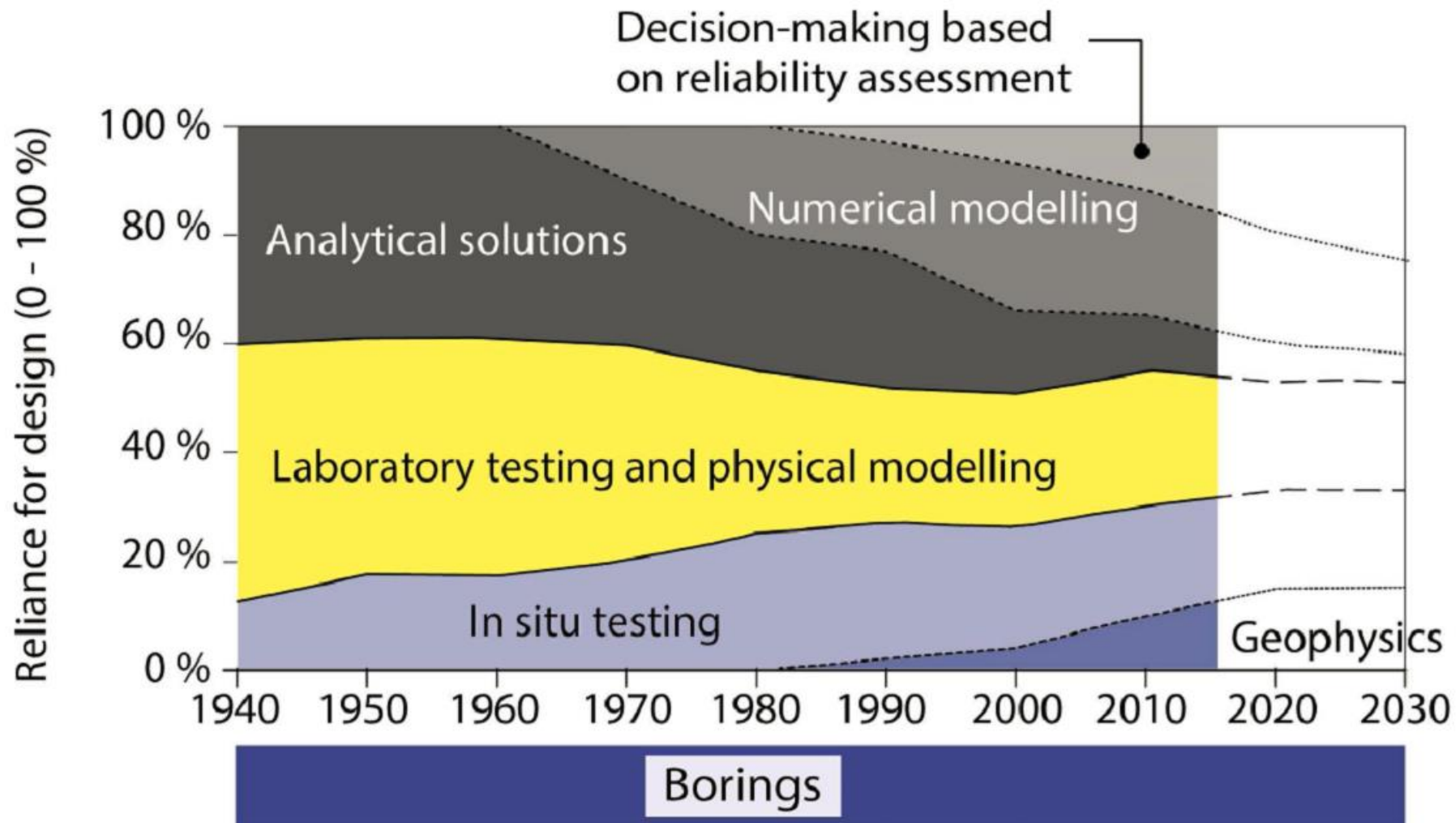
(Clayton 2001)



(US National Committee on Tunnelling Technology, 1984)

Τη γεωτεχνική έρευνα θα την πληρώσεις,
είτε την κάνεις είτε δεν την κάνεις...

Εξέλιξη γεωτεχνικής πρακτικής... η σημασία της γεωτεχνικής έρευνας παραμένει αναλλοίωτη (ποιες είναι όμως οι επιμέρους τάσεις;;;)



Πηγή: Lacasse S. (2015). Hazard, risk and reliability in geotechnical practice, 55th Rankine Lecture.