



# «Τεχνική Γεωλογία Υπογείων Έργων»

## 4<sup>ο</sup> Μάθημα Συμπεριφορά βραχομαζών στις σήραγγες

Διδάσκων: **Β. Μαρίνος, Επ. Καθηγητής**

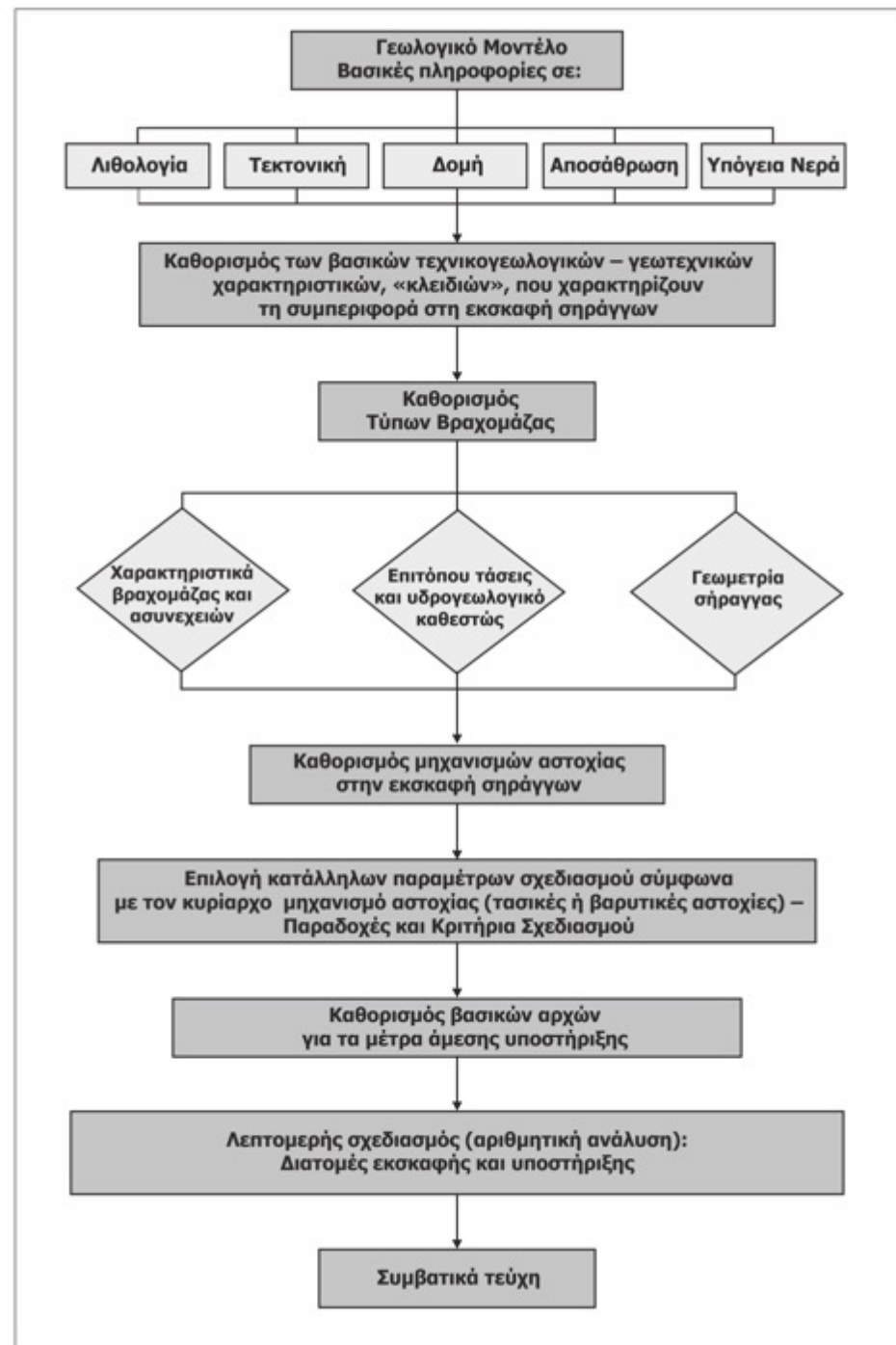
- Γεωτεχνικός Τομέας, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ

[marinosv@civil.ntua.gr](mailto:marinosv@civil.ntua.gr)

# Βήματα τεχνικογεωλογικής αξιολόγησης για το γεωτεχνικό σχεδιασμό των σηράγγων

Ειδική έμφαση στον  
μηχανισμό αστοχίας

(Τροποποιημένο από  
Austrian Society of  
Geomechanics, 2010  
version 2.1)



**Γεωλογικό Μοντέλο  
Βασικές πληροφορίες σε:**

**Λιθολογία**

**Τεκτονική**

**Δομή**

**Αποσάθρωση**

**Υπόγεια Νερά**

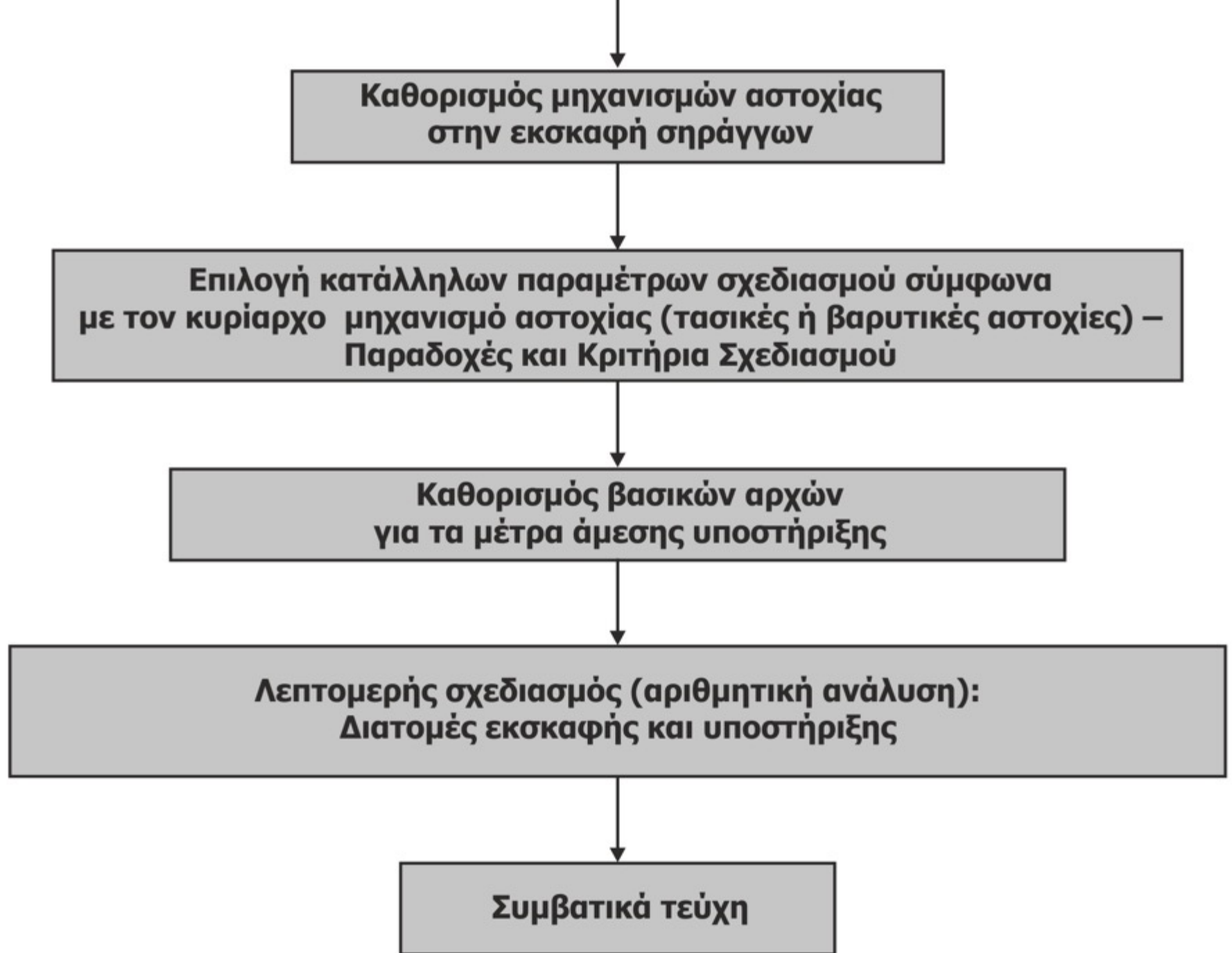
**Καθορισμός των βασικών τεχνικογεωλογικών – γεωτεχνικών  
χαρακτηριστικών, «κλειδιών», που χαρακτηρίζουν  
τη συμπεριφορά στη εκσκαφή σηράγγων**

**Καθορισμός  
Τύπων Βραχομάζας**

**Χαρακτηριστικά  
βραχομάζας και  
ασυνεχειών**

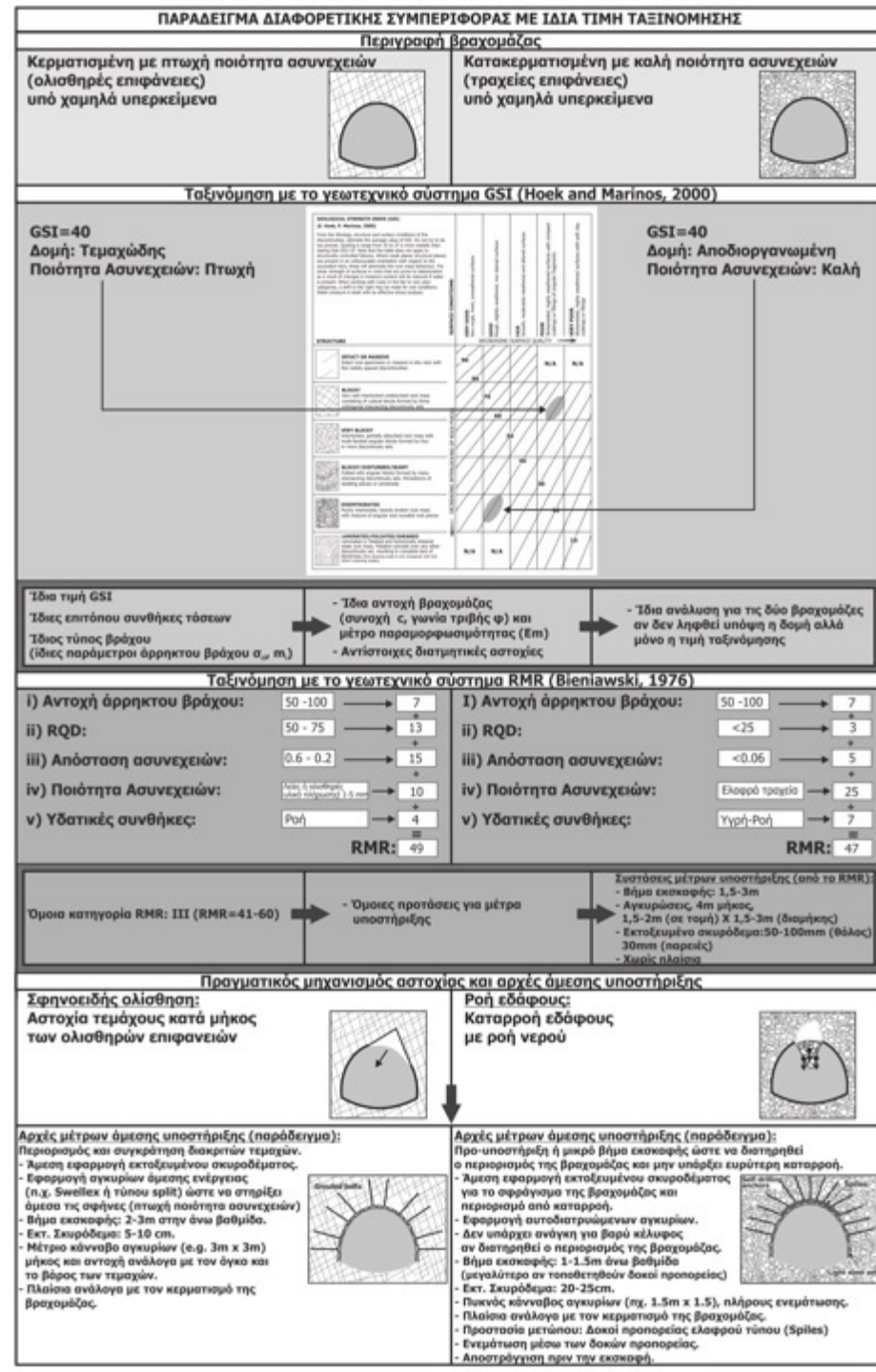
**Επιτόπου τάσεις  
και υδρογεωλογικό  
καθεστώς**

**Γεωμετρία  
σήραγγας**



# Εκτίμηση του μηχανισμού – τύπου αστοχίας

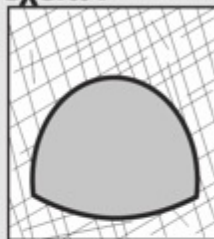
Γιατί είναι σημαντική στον γεωτεχνικό σχεδιασμό;



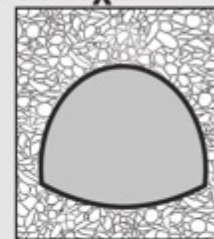
# ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΜΕ ΙΔΙΑ ΤΙΜΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ

## Περιγραφή βραχομάζας

Κερματισμένη με πτωχή ποιότητα ασυνεχειών  
(ολισθηρές επιφάνειες)  
υπό χαμηλά υπερκείμενα



Κατακερματισμένη με καλή ποιότητα ασυνεχειών  
(τραχείες επιφάνειες)  
υπό χαμηλά υπερκείμενα



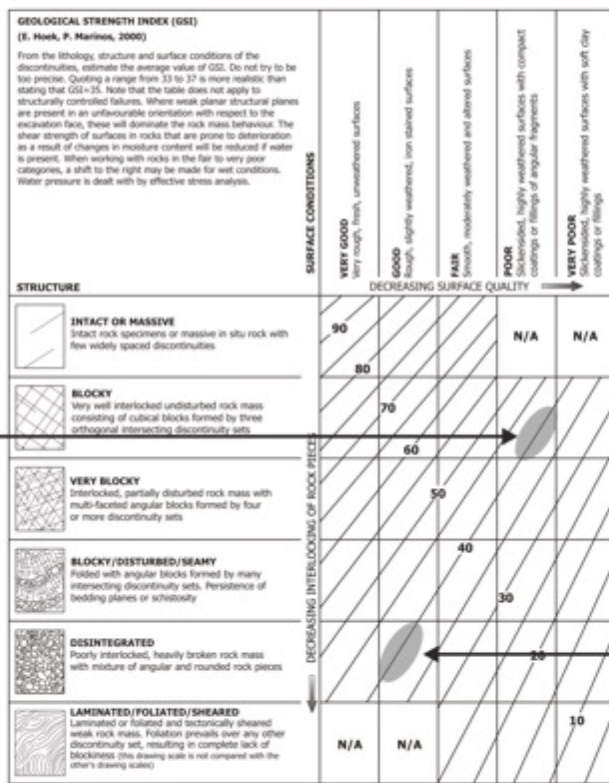
## Ταξινόμηση με το γεωτεχνικό σύστημα GSI (Hoek and Marinos, 2000)

**GSI=40**

**Δομή: Τεμαχώδης  
Ποιότητα Ασυνεχειών: Πτωχή**

**GSI=40**

**Δομή: Αποδιοργανωμένη  
Ποιότητα Ασυνεχειών: Καλή**



Ίδια τιμή GSI

Ίδιες επιτόπου συνθήκες τάσεων

Ίδιος τύπος βράχου

(Ίδιες παράμετροι άρρηκτου βράχου  $\sigma_{cr}$ ,  $m_i$ )

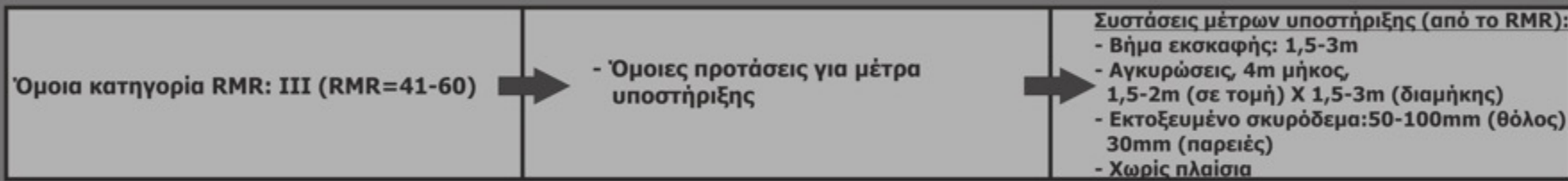
- Ίδια αντοχή βραχομάζας (συνοχή  $c$ , γωνία τριβής  $\phi$ ) και μέτρο παραμορφωσιμότητας ( $E_m$ )  
- Αντίστοιχες διατμητικές αστοχίες

- Ίδια ανάλυση για τις δύο βραχομάζες αν δεν ληφθεί υπόψη η δομή αλλά μόνο η τιμή ταξινόμησης

## Ταξινόμηση με το γεωτεχνικό σύστημα RMR (Bieniawski, 1976)

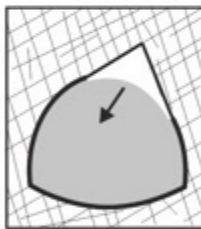
i) Αντοχή άρρηκτου βράχου:	50 -100	→	7
ii) RQD:	50 - 75	→	13
iii) Απόσταση ασυνχειών:	0.6 - 0.2	→	15
iv) Ποιότητα Ασυνχειών:	Λείες ή ολισθηρές υλικό πλήρωσης 1-5 mm	→	10
v) Υδατικές συνθήκες:	Ροή	→	4
			=
<b>RMR:</b>			49

I) Αντοχή άρρηκτου βράχου:	50 -100	→	7
ii) RQD:	<25	→	3
iii) Απόσταση ασυνχειών:	<0.06	→	5
iv) Ποιότητα Ασυνχειών:	Ελαφρά τραχεία	→	25
v) Υδατικές συνθήκες:	Υγρή-Ροή	→	7
			=
<b>RMR:</b>			47

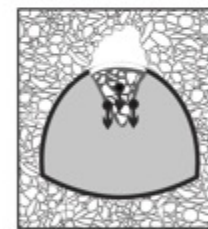


### Πραγματικός μηχανισμός αστοχίας και αρχές άμεσης υποστήριξης

**Σφηνοειδής ολισθηση:**  
Αστοχία τεμάχους κατά μήκος των ολισθηρών επιφανειών

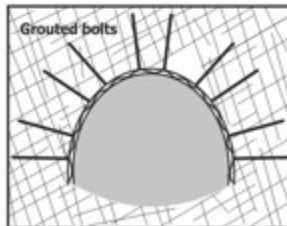


**Ροή εδάφους:**  
Καταρροή εδάφους με ροή νερού



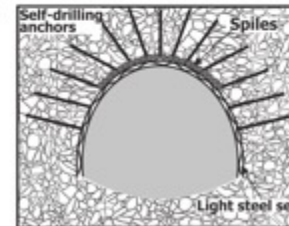
#### Αρχές μέτρων άμεσης υποστήριξης (παράδειγμα):

- Περιορισμός και συγκράτηση διακριτών τεμαχίων.
- Άμεση εφαρμογή εκτοξευμένου σκυροδέματος.
  - Εφαρμογή αγκυριών άμεσης ενέργειας (π.χ. Swellex ή τύπου split) ώστε να στηρίξει άμεσα τις σφήνες (πτωχή ποιότητα ασυνχειών)
  - Βήμα εκσκαφής: 2-3m στην άνω βαθμίδα.
  - Εκτ. Σκυρόδεμα: 5-10 cm.
  - Μέτριο κάνναβο αγκυριών (e.g. 3m x 3m) μήκος και αντοχή ανάλογα με τον όγκο και το βάρος των τεμαχίων.
  - Πλαίσια ανάλογα με τον κερματισμό της βραχομάζας.



#### Αρχές μέτρων άμεσης υποστήριξης (παράδειγμα):

- Προ-υποστήριξη ή μικρό βήμα εκσκαφής ώστε να διατηρηθεί ο περιορισμός της βραχομάζας και μην υπάρξει ευρύτερη καταρροή.
- Άμεση εφαρμογή εκτοξευμένου σκυροδέματος για το σφράγισμα της βραχομάζας και περιορισμό από καταρροή.
  - Εφαρμογή αυτοδιατρυώμενων αγκυριών.
  - Δεν υπάρχει ανάγκη για βαρύ κέλυφος αν διατηρηθεί ο περιορισμός της βραχομάζας.
  - Βήμα εκσκαφής: 1-1.5m άνω βαθμίδα (μεγαλύτερο αν τοποθετηθούν δοκοί προπορείας)
  - Εκτ. Σκυρόδεμα: 20-25cm.
  - Πυκνός κάνναβος αγκυριών (πχ. 1.5m x 1.5), πλήρους ενεμάτωσης.
  - Πλαίσια ανάλογα με τον κερματισμό της βραχομάζας.
  - Προστασία μετώπου: Δοκοί προπορείας ελαφρού τύπου (Spiles)
  - Ενεμάτωση μέσω των δοκών προπορείας.
  - Αποστράγγιση πριν την εκσκαφή.



# Τύποι Τεχνηκογεωλογικής συμπεριφοράς της βραχόμαζας

- Στην φάση της εκσκαφής σκοπός της άμεσης υποστήριξης είναι η ευστάθεια του μετώπου και του δακτυλίου της σήραγγας μέχρι την εφαρμογή των μέτρων της τελικής επένδυσης.
- Αστάθεια δακτυλίου:
  - αστοχία με μεγάλες συγκλίσεις
  - με μορφή σφηνών
  - κατάπτωση τύπου καμινάδας
  - καταρροή της βραχόμαζας
- Αστάθεια μετώπου:
  - Έκθλιψη μετώπου σε βραχόμαζες με πολύ φτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά
  - Ολίσθηση τεμάχους βράχου από ασυνέχειες, δυσμενούς προσανατολισμού και αντοχής



# Κυρίαρχοι μηχανισμοί αστοχίας κατά την εκσκαφή σηράγγων

Η συμπεριφορά της βραχόμαζας, εδώ, ορίζεται ως η αντίδρασή της στην εκσκαφή σε ένα υπόγειο άνοιγμα χωρίς όμως να λαμβάνονται υπόψη οι διαδικασίες υποστήριξης και αλληλεπίδρασης με άλλες φάσεις.

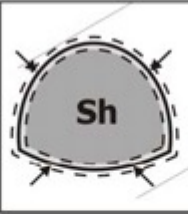

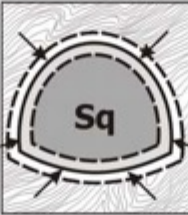



**Σχηματική παρουσίαση των κατηγοριών τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς γεωυλικών κατά τη διάνοιξη σηράγγων.**

ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΙΚΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΗΣ			ΤΥΠΟΣ ΑΝΑΘΙΣΤΕΑΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΕ ΥΠΟΓΕΙΤΗΜΕΝΗ ΣΗΡΑΓΓΑ
St	Ευσταθής διάτομη με τοπικές μόνο βαρυτικές αστοχίες. Η βραχόμαζα είναι ομοιογενής με περιορισμένες ασυνέχειες.		
Br	Ψαθυρή θραύση ή εκτίναξη σχορού βράχου σε πολύ μεγάλα βάρη.		
Wg	Στην οριζόντια αλιεία ή επίλυση πελαγίων λόγω βαρύτητας. Ασημαντές παραμορφώσεις. Η βραχόμαζα είναι μέτρια έως αρκετά κερματισμένη εφάπτοντας μολκ προς ελεύθερη πτώση ή αλιεία. Η ευστάθεια ελέγχεται από τα γεωμετρικά των ασυνεχειών όπως η αντοχή των ασυνεπειών, η οποία εκαρδύεται από την κλίση (α) και τη συνολική (c), και τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά όπως η κλίση, η φερό κλίση, η εμμονή και η απόσταση τους. Ο λόγος της αντοχής της βραχόμαζας προς τις επιπέδου τάσεις ( $\sigma_{\text{v}}/\rho$ ) είναι μεγάλος ( $>0.6-0.7$ ) και δεν δημιουργούνται συνθήκες παραμορφώσεως ( $\epsilon < 1\%$ ).		
Ch	Κατάπτωση τύπου καμινάδας. Η βραχόμαζα είναι έντονα κερματισμένη διατηρώντας τις περισσότερες φορές τη δομή της (ή τουλάχιστον η βραχόμαζα περιμετρικά αυτής). Έχει συνήθως ανοικτή δομή μακριά από αλληλοκλεισίματα και σε συνδυασμό πολλές φορές με τις μικρές πλευρικές τάσεις μπορεί να οδηγήσει σε καταπτώσεις που προοδικτικά αναπτύσσονται και δημιουργούν υπερανοικιαρή τύπου καμινάδας η οποία μπορεί ή όχι να γεφυρώνεται (εξαρτάμενη από τις επιπέδου συνθήκες) πάνω από τη σήραγγα. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν και περιπτώσεις πλήρως αποδοιοργανωμένης βραχόμαζας ακόμα και σε μεγάλα υπερκείμενα με μεγάλες πλευρικές τάσεις.		
Rv	Κατάρση βραχόμαζας. Η βραχόμαζα είναι αποδοιοργανωμένη και αντετραμμένη ή φαλλοποιημένη με μηδενική πρακτικά αντοχή και εξαρτάμενη από το βαθμό αλληλοκλεισίματος (ανοικτή ή κλειστή δομή) των άρρηκτων πελαγίων (περίπτωση Rv1) αλλά και πιθανών δειπυρογενών υλικών, π.χ. αρμύλου (περίπτωση Rv2), μπορεί να προκαλέσει άμεση γενική κατάρση της βραχόμαζας στο εσωτερικό και στο μέγιστο της σήραγγας. Η διαφορά σε σχέση με την κατάσταση τύπου καμινάδας (Ch) έγκειται στο μέγεθος των πελαγίων όπου εδώ είναι πολύ μικρά, στο χρόνο κατάπτωσης, όπου εδώ εκδηλώνεται άμεσα, και πολλές φορές στην έκταση της αστοχίας όπου εδώ μπορεί να είναι μεγαλύτερη λόγω αδυναμίας εύρεσης βραχόμαζας με καλύτερο αλληλοκλεισίματα για να γεφυρώσει σχετικά άμεσα πάνω από τη σήραγγα.		
FI	Ροή βραχόμαζας με έντονη παρουσία νερού. Η βραχόμαζα είναι κατακερματισμένη και αποδοιοργανωμένη με μηδενική αντοχή, με έντονη παρουσία υποεπιπέδου νερού, ανάμεσα στο πελάγι, προκαλεί άμεση ροή βραχόμαζας και νερού στο εσωτερικό της σήραγγας.		
Sh	Μικρές έως μέτριες παραμορφώσεις, με την εκδήλωση διατμητικών αστοχιών σε ζώνη μικρή έκτασης περιμετρικά της σήραγγας. Η βραχόμαζα αποτελείται από τεμάχια άρρηκτου βράχου μικρής αντοχής (συνήθως $\sigma_c < 15 \text{ MPa}$ ) ενώ η δομή της βραχόμαζας, μέσω του GSI, μείναι περισσότερο την αντοχή αυτή. Το βάρος των υπερκείμενων για την εκδήλωση των παραμορφώσεων είναι είτε μικρό έως μέτρο (πάρη τα 50m) στην περίπτωση επαχθούς ποιότητας διατμημένης βραχόμαζας, είτε μεγαλύτερο για καλύτερης ποιότητας βραχόμαζας. Ο λόγος του $\sigma_{\text{v}}/\rho$ στην περίπτωση αυτή είναι μικρός ( $0.3 < \sigma_{\text{v}}/\rho < 0.6$ ) και αναμενόνται η παρατηρούνται μέτριες παραμορφώσεις ( $1-2.5\%$ ).		
Sq	Σημαντικές παραμορφώσεις λόγω υπερφόρτωσης από την εκδήλωση διατμητικών αστοχιών σε εκτεταμένη ζώνη περιμετρικά της σήραγγας. Η βραχόμαζα αποτελείται από τεμάχια άρρηκτου βράχου μικρής αντοχής ( $\sigma_c < 15 \text{ MPa}$ ) ενώ η δομή της βραχόμαζας, μέσω του GSI, μείναι περισσότερο την αντοχή αυτή. Ο λόγος του $\sigma_{\text{v}}/\rho$ στην περίπτωση αυτή είναι μικρός ( $\sigma_{\text{v}}/\rho < 0.3$ ) και αναμενόνται ή παρατηρούνται παραμορφώσεις $> 2.5\%$ , ενώ μπορεί να εκδηλώνονται και παραμορφώσεις και στο μέγιστο προκαλίνας πλέον ένα πρόβλημα τριών διαστάσεων.		
Sw	Διογκούμενο έδαφος. Η βραχόμαζα αποτελείται από σημαντική παρουσία διογκούμενων ορυκτών όπως μοντηρομίλιτης, αματίτης, ανδράτης κ.α. τα οποία με την παρουσία νερού, ακόμα και της υγρασίας του εσωτερικού περιβάλλοντος της σήραγγας, διογκώνονται και μπορεί να προκαλέσουν σημαντικές παραμορφώσεις (π.χ. η αναμενόμενη διογκωση του ανδράτη το 60%). Αυτές εκδηλώνονται κυρίως στο δώδεκο της σήραγγας (όταν αυτό δεν είναι κλειστό).		

# Κατηγορίες Τεχνικογεωλογικής Συμπεριφοράς

ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΑΝΥΠΟΣΤΗΡΙΚΤΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

ΤΥΠΟΣ ΑΝΑΛΟΓΗΣ  
ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΕ  
ΥΠΟΣΤΗΡΙΓΜΕΝΗ  
ΣΗΡΑΓΓΑ

Sh	<p>Μικρές έως μέτριες παραμορφώσεις, με την εκδήλωση διατμητικών αστοχιών σε ζώνη μικρή έκτασης περιμετρικά της σήραγγας. Η βραχόμαζα αποτελείται από τεμάχια άρρηκτου βράχου μικρής αντοχής (συνήθως <math>\sigma_{ci} &lt; 15</math> MPa) ενώ η δομή της βραχόμαζας, μέσω του GSI, μειώνει περαιτέρω την αντοχή αυτή. Το βάρος των υπερκειμένων για την εκδήλωση των παραμορφώσεων είναι είτε μικρό έως μέτριο (περί τα 50m) στην περίπτωση πτωχής ποιότητας διατμημένης βραχόμαζας, είτε μεγαλύτερο για καλύτερης ποιότητας βραχόμαζες. Ο λόγος του <math>\sigma_{cm}/\rho_o</math> στην περίπτωση αυτή είναι μικρός (<math>0.3 &lt; \sigma_{cm}/\rho_o &lt; 0.6</math>) και αναμένονται ή παρατηρούνται μέτριες παραμορφώσεις (1-2.5%).</p>		
Sq	<p>Σημαντικές παραμορφώσεις λόγω υπερφόρτισης από την εκδήλωση διατμητικών αστοχιών σε εκτεταμένη ζώνη περιμετρικά της σήραγγας. Η βραχόμαζα αποτελείται από τεμάχια άρρηκτου βράχου μικρής αντοχής (<math>\sigma_{ci} &lt; 15</math> MPa) ενώ η δομή της βραχόμαζας, μέσω του GSI, μειώνει περαιτέρω την αντοχή αυτή. Ο λόγος του <math>\sigma_{cm}/\rho_o</math> στην περίπτωση αυτή είναι μικρός (<math>\sigma_{cm}/\rho_o &lt; 0.3</math>) και αναμένονται ή παρατηρούνται παραμορφώσεις <math>&gt; 2.5\%</math>, ενώ μπορεί να εκδηλώνονται και παραμορφώσεις και στο μέτωπο προκαλώντας πλέον ένα πρόβλημα τριών διαστάσεων</p>		
Sw	<p>Διογκούμενο έδαφος. Η βραχόμαζα αποτελείται από σημαντική παρουσία διογκούμενων ορυκτών όπως μοντμοριλονίτης, σμεκτίτης, ανυδρίτης κ.α. τα οποία με την παρουσία νερού, ακόμα και της υγρασίας του εσωτερικού περιβάλλοντος της σήραγγας, διογκώνονται και μπορεί να προκαλέσουν σημαντικές παραμορφώσεις (π.χ. η ανεμπόδιστη διόγκωση του ανυδρίτη τα 60%). Αυτές εκδηλώνονται κυρίως στο δάπεδο της σήραγγας όταν αυτό δεν είναι κλειστό.</p>		

# Μηχανισμοί αστοχίας

## Παραδείγματα

Καταρροή εδάφους



Σφηνοειδείς αποκολλήσεις  
– ολισθήσεις



# Μηχανισμοί αστοχίας

## Παραδείγματα

Κατάπτωση τύπου  
«καμινάδας» - υπερεσκαφή



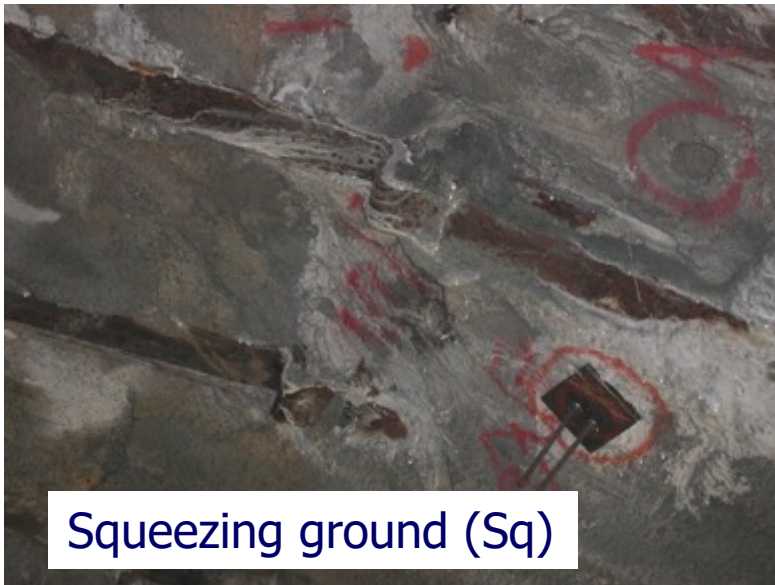
Κατάπτωση τύπου  
«καμινάδας» - υπερεσκαφή



# Μηχανισμοί αστοχίας

## Παραδείγματα

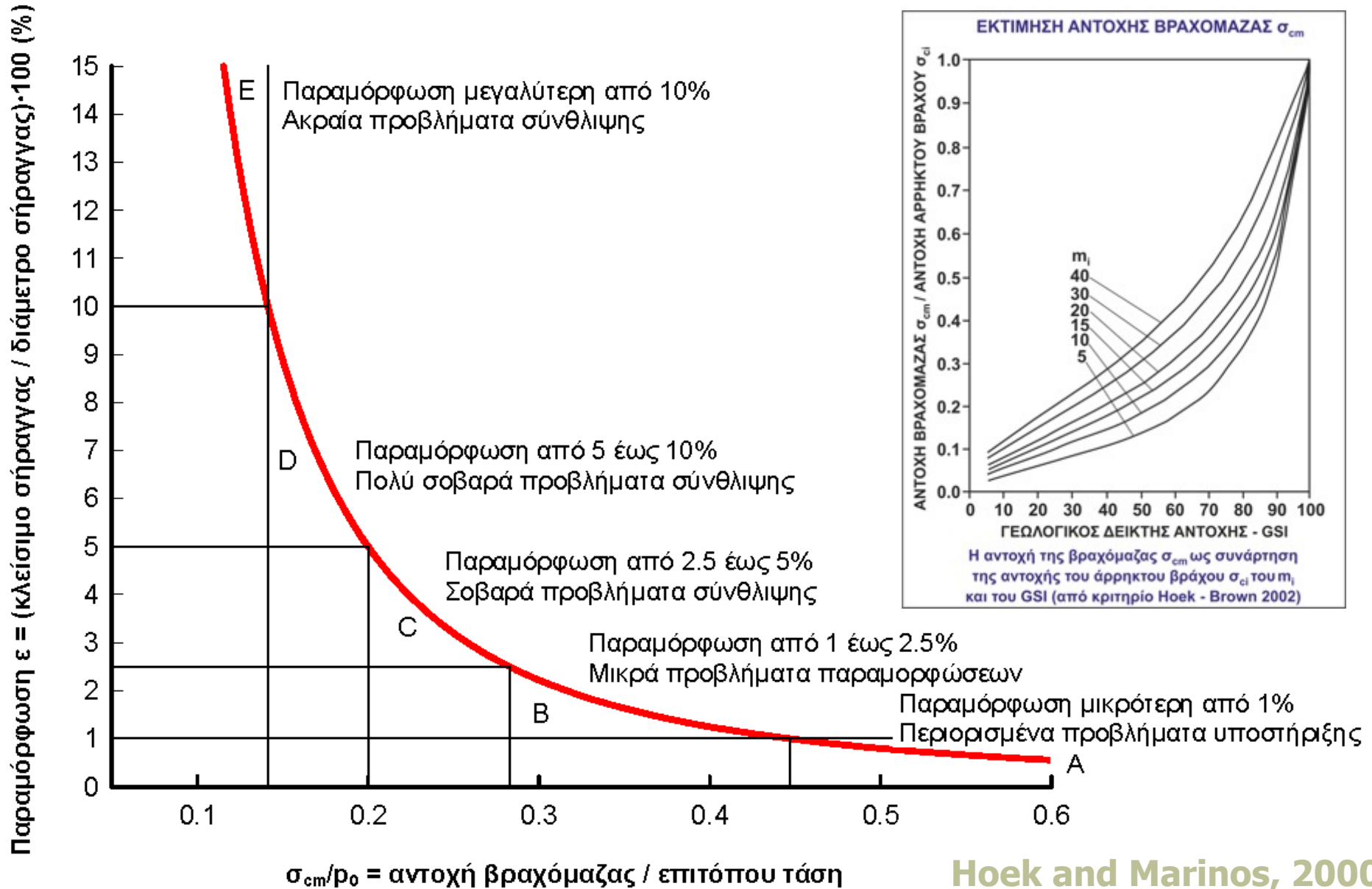
Σύνθλιψη εδάφους  
Υπερφόρτιση κελύφους -  
«λυγισμένα» πλαίσια



Σύνθλιψη εδάφους  
κάτω από υπερκείμενα 1200m  
σε γραφιτικό σχιστόλιθο



# Πρόβλεψη φαινομένων σύνθλιψης. Μία αρχική προσέγγιση



# Πρόβλεψη φαινομένων σύνθλιψης σε ασθενείς βραχομάζες. Μία αρχική προσέγγιση



Yacambu-Quibor  
water transfer tunnel,  
Venezuela



Nathpa Jhakri  
headrace tunnel,  
India



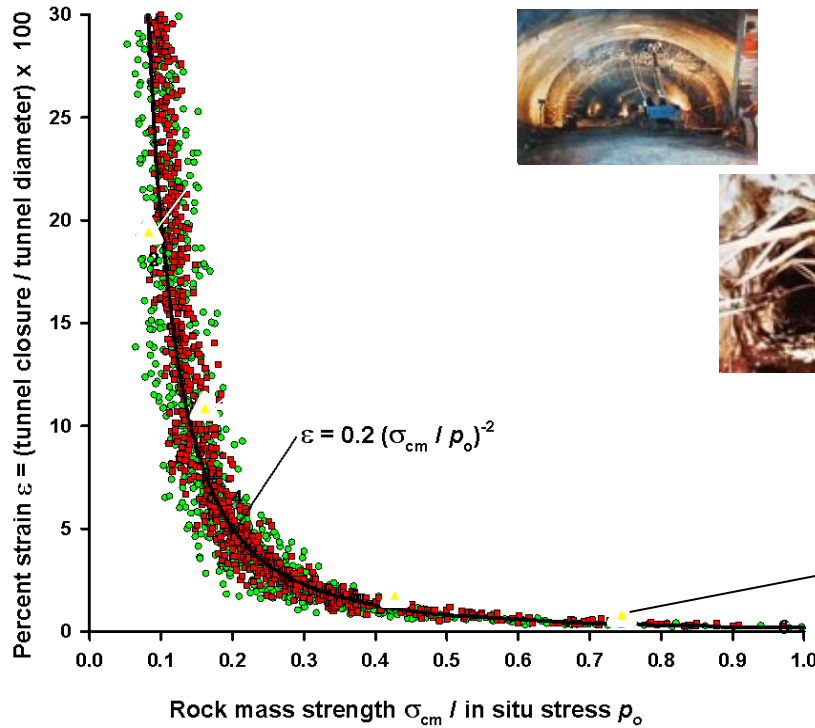
Mucha highway  
tunnel, Taiwan



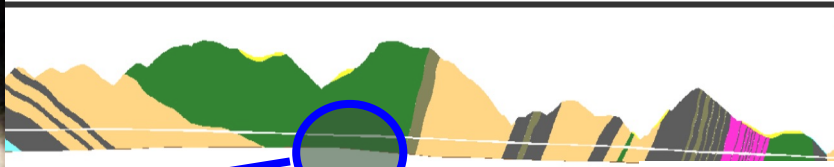
Old mine  
tunnel,  
Africa



Driskos highway  
tunnel, Greece



Hoek & Marinos, 2000

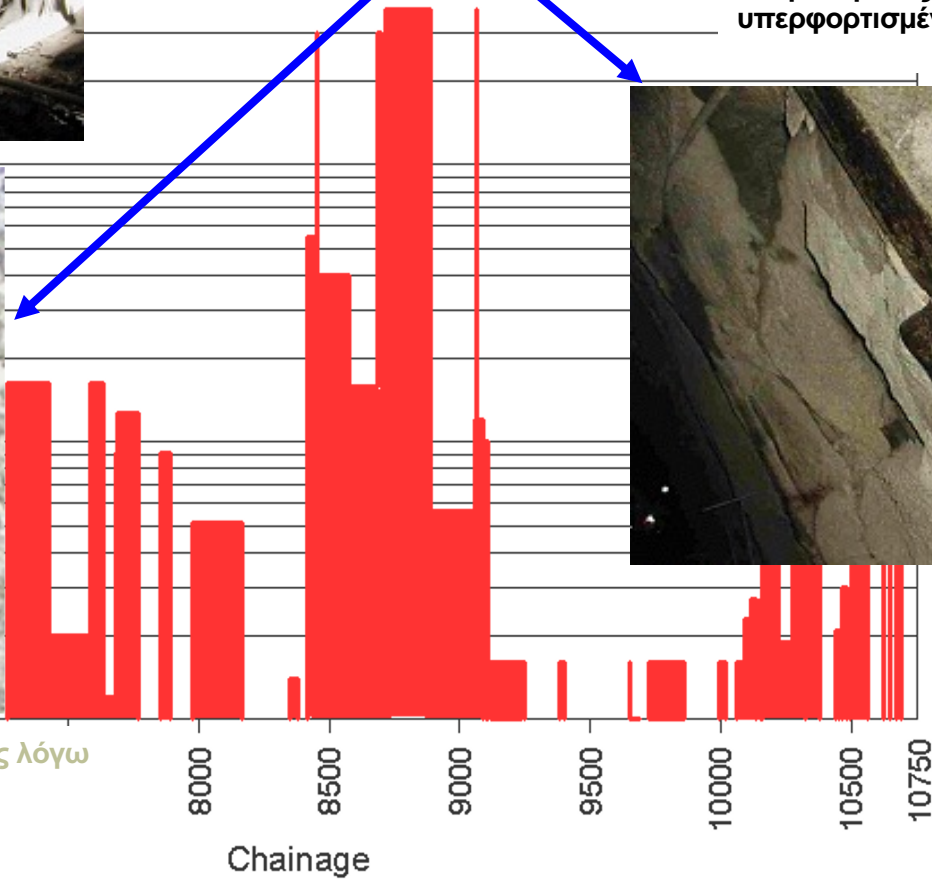


Σήραγγα Δρίσκου

Αστοχία εκτοξευμένου  
σκυροδέματος γύρω από ένα  
υπερφορτισμένο πλαίσιο



Παραμορφωμένη πλάκα αγκύρωσης λόγω  
υπερφόρτισης του κελύφους της  
προσωρινής υποστήριξης

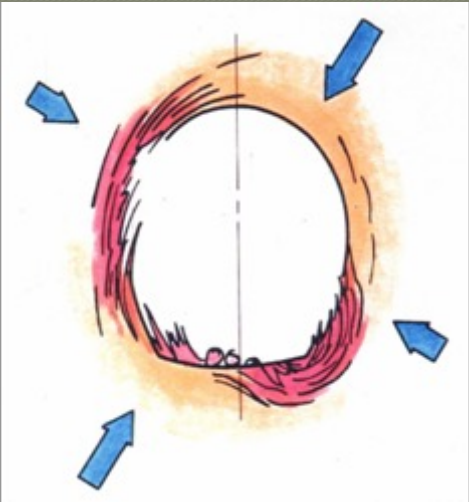


Προβλεφθείσες συγκλίσεις με βάση το  $\sigma_{cm}$  και το υπερκείμενο  $p_0$



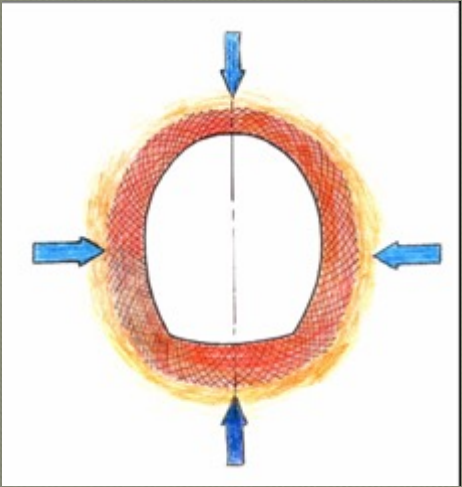
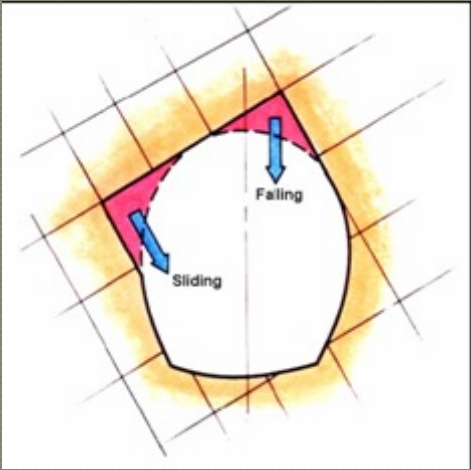
# ΚΥΡΙΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

# ΚΥΡΙΟΙ ΤΥΠΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΣΗΡΑΓΓΑ



a. Ψαθυρή θραύση ισχυρού βράχου χωρίς ασυνέχειες, κατω από υψηλές επί τόπου τάσεις.

b. Πτώσεις βαρύτητας ή ολίσθηση τεμαχών ή σφηνών οριζομένων από τεμνομενες δομικές επιφάνειες της βραχώμαζας.



c. Σχηματισμός μιάς «πλαστικής» ζώνης από διατμητική αστοχία ασθενούς βράχου ή βραχώμαζας κάτω από υψηλές τάσεις σε σχέση με την αντοχή της βραχώμαζας

## Αστοχία Τύπου ...?





Σήραγγα. Τυμφρηστού. Φαινόμενα σύνθλιψης στον φλύσχη: σύγκλιση οροφής σε σήραγγα σε περιβάλλον ασθενούς διατμημένου φλύσχη

## Αστοχία Τύπου ...?



Repair of Station 2+100 showing collapsed tunnel in the background and the replacement lining in the foreground.

Σήραγγα Yacambu σε φυλλίτες, 1300m υπερκείμενο

# Αστοχία Τύπου ...?



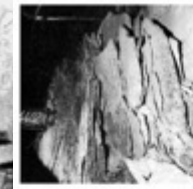
# Αστοχία Τύπου ...?



# Αστοχία Τύπου ...?



Μεταλλείο σε  
βάθος 2000m στη  
Ν. Αφρική



Σήραγγα Λευκού όρους, 2500m





Αστοχία τύπου ...?



Σήραγγα Βάσης Lyon-Torino. Παράθυρο La Praz, 2007



Athens Metro photograph in  
tunnel after collapse

Athens Metro photograph shown a line of gravel along the centre of the invert. According to some reports this was a pervious filling for a drainage channel than had either been cast or cut into the bottom of the temporary invert.



Another photograph of the collapse cavity on 7 January 2003 showing the recovery of the car that fell into the hole. The collapse occurred at about 4 am and there was only one vehicle on the road at the time. The car rode down on top of the failing mass and the driver escaped with only minor injuries









**Athens Metro photograph in  
tunnel after collapse**

An Athens Metro photograph of shearing of the shotcrete connection between the sidewall and invert. This is considered to be one of the possible causes of the tunnel collapse

# Εκτίμηση Τεχνικογεωλογικής Συμπεριφοράς στις σήραγγες

## Tunnel Behaviour Chart (TBC)

TUNNEL BEHAVIOUR CHART (TBC) FOR ROCK MASSES (V. Marinós)*						
ROCK MASS STRUCTURE (As in GSI, Hoek & Marinos, 2000)	OVERBURDEN (H) (Rock masses for up to several hundreds metres**)					
	Small overburden		Large overburden			
	INTACT ROCK STRENGTH ( $\sigma_c$ ) Indicative limit: $\sigma_c \sim 15$ Mpa Low $\sigma_c$ High $\sigma_c$		INTACT ROCK STRENGTH ( $\sigma_c$ ) Indicative limit: $\sigma_c \sim 15$ Mpa Low $\sigma_c$ High $\sigma_c$			
 <b>INTACT OR MASSIVE</b> Intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	OVERBURDEN (H) LIMIT: ~150 m		1	2	3	4
	St	St	Sh	St		
 <b>BLOCKY</b> Well interlocked undisturbed rock mass consisting of blocks formed by three orthogonal intersecting discontinuity sets	OVERBURDEN (H) LIMIT: ~100 m		5	6	7	8
	Wg	Wg	Sh-Wg	St-Wg		
 <b>VERY BLOCKY</b> Interlocked, partially disturbed rock mass with multi-faceted angular blocks formed by four or more discontinuity sets	OVERBURDEN (H) LIMIT: ~70 m		9	10	11	12
	Wg-Ch Sh	Wg-Ch	Sh	Wg		
 <b>BLOCKY/DISTURBED/SEAMY</b> Folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity. It is understood that the rock mass is disturbed and anisotropy can be developed	OVERBURDEN (H) LIMIT: ~70 m		13	14	15	16
	Ch-Wg Sh	Ch-Wg	S(Sh-Sq) Ch	Ch-Sh		
 <b>DISINTEGRATED</b> Poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces	OVERBURDEN (H) LIMIT: ~70 m		17	18	19	20
	Sh-Rv	Rv	Sq-Ch	Ch-Sh		
 <b>LAMINATED/FOLIATED/SHEARED</b> Laminated or foliated and tectonically sheared weak rock mass. Foliation prevails over any other discontinuity set, resulting in complete lack of blockiness (this drawing scale is not compared with the other's drawing scales)	OVERBURDEN (H) LIMIT: ~70 m		21	22	23	24
	Sh-Ch	Sh-Ch	Sq	Sq		































Tunnel rock mass behaviour types (St, Wg, Sh, Sq, Rv, Ch) as defined in figure 3

The engineering geological behaviour may be also controlled by two or three different mechanisms (e.g. Sh-Ch)

### Notes:

- \* The data used in the TBC were obtained from tunnels excavated by the conventional method with top heading and bench in a non-urban environment with the overburden cover up to several hundred metres (generally not exceeding 500m) with a tunnel diameter=12m
- \*\* The chart does not refer to very high overburden (e.g. many hundreds of m or >1000m), where the scale and the mechanism of failure may differ
- † The limit-ranges of the uniaxial compressive strength ( $\sigma_c$ ) of the intact rock and the overburden thickness (H) are indicative. This is done to avoid standardisation by an inexperienced user. The purpose of this diagram is to predict the failure mechanism of several common rock mass types.
- ‡ The surface condition of discontinuities, the second component to the GSI system, mainly affect the intensity of the failure phenomenon
- § High clay presence along the discontinuities or zones in the rock mass may shift the gravity driven behaviour types towards the vertical axis of the chart (e.g. from Wg[9] to Ch [13])
- ¶ Groundwater presence mainly affects the factor of safety and not the behaviour type. Though, in some cases, such as "Blocky-Disturbed" & "Disintegrated" rock mass, the groundwater presence may "shift" a Chimney (Ch) or Ravelling (Rv) behaviour type to Flowing ground (F)
- ‡ Cases number 4, 8 and 12 may develop brittle failures (Br) when overburden increases considerably (e.g. >800 m) depending on the intact rock strength
- ¶ The illustrations of the tunnel are sketches; this shape corresponds to the usual top heading

# TUNNEL BEHAVIOUR CHART (TBC) FOR ROCK MASSES (V. Marinos)\*

<b>ROCK MASS STRUCTURE</b> (As in GSI, Hoek & Marinos, 2000)	<b>OVERBURDEN (H)</b> (Rock masses for up to several hundreds metres**)			
	Small overburden		Large overburden	
	<b>INTACT ROCK STRENGTH (<math>\sigma_c</math>)</b> Indicative limit: $\sigma_c \sim 15$ Mpa Low $\sigma_c$ High $\sigma_c$		<b>INTACT ROCK STRENGTH (<math>\sigma_c</math>)</b> Indicative limit: $\sigma_c \sim 15$ Mpa Low $\sigma_c$ High $\sigma_c$	
 <p><b>INTACT OR MASSIVE</b> Intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities</p>	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; width: 60px; height: 60px; display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <span style="font-size: 10px;">1</span> </div> 	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; width: 60px; height: 60px; display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <span style="font-size: 10px;">2</span> </div> 	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; width: 60px; height: 60px; display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <span style="font-size: 10px;">3</span> </div> 	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; width: 60px; height: 60px; display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <span style="font-size: 10px;">4</span> </div> 
 <p><b>BLOCKY</b> Well interlocked undisturbed rock mass consisting of blocks formed by three orthogonal intersecting discontinuity sets</p>	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; width: 60px; height: 60px; display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <span style="font-size: 10px;">5</span> </div> 	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; width: 60px; height: 60px; display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <span style="font-size: 10px;">6</span> </div> 	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; width: 60px; height: 60px; display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <span style="font-size: 10px;">7</span> </div> 	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; width: 60px; height: 60px; display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <span style="font-size: 10px;">8</span> </div> 
 <p><b>VERY BLOCKY</b> Interlocked, partially disturbed rock mass with multi-faceted angular blocks formed by four or more discontinuity sets</p>	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; width: 60px; height: 60px; display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <span style="font-size: 10px;">9</span> </div> 	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; width: 60px; height: 60px; display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <span style="font-size: 10px;">10</span> </div> 	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; width: 60px; height: 60px; display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <span style="font-size: 10px;">11</span> </div> 	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; width: 60px; height: 60px; display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <span style="font-size: 10px;">12</span> </div> 
 <p><b>BLOCKY/DISTURBED/SEAMY</b> Folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity. It is understood that the rock mass is disturbed and anisotropy can be developed</p>	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; width: 60px; height: 60px; display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <span style="font-size: 10px;">13</span> </div> 	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; width: 60px; height: 60px; display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <span style="font-size: 10px;">14</span> </div> 	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; width: 60px; height: 60px; display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <span style="font-size: 10px;">15</span> </div> 	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; width: 60px; height: 60px; display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <span style="font-size: 10px;">16</span> </div> 
 <p><b>DISINTEGRATED</b> Poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces</p>	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; width: 60px; height: 60px; display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <span style="font-size: 10px;">17</span> </div> 	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; width: 60px; height: 60px; display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <span style="font-size: 10px;">18</span> </div> 	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; width: 60px; height: 60px; display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <span style="font-size: 10px;">19</span> </div> 	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; width: 60px; height: 60px; display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <span style="font-size: 10px;">20</span> </div> 
 <p><b>LAMINATED/FOLIATED/SHEARED</b> Laminated or foliated and tectonically sheared weak rock mass. Foliation prevails over any other discontinuity set, resulting in complete lack of blockiness (this drawing scale is not compared with the other's drawing scales)</p>	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; width: 60px; height: 60px; display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <span style="font-size: 10px;">21</span> </div> 	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; width: 60px; height: 60px; display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <span style="font-size: 10px;">22</span> </div> 	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; width: 60px; height: 60px; display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <span style="font-size: 10px;">23</span> </div> 	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; width: 60px; height: 60px; display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <span style="font-size: 10px;">24</span> </div> 

OVERBURDEN (H) LIMIT: ~150 m

H LIMIT: ~100 m

OVERBURDEN (H) LIMIT: ~70 m

# ***Βιβλιογραφία - Προδιαγραφές***

- Ο.Σ.Μ.Ε.Ο: Εγνατία Όδος Α.Ε. (Οδηγίες Σύνταξης Μελετών Εγνατίας Οδού)
- Προδιαγραφές Αττικό Μετρό για τη σύνταξη Γεωλογικών και Τεχνικογεωλογικών Μελετών.
- Austrian Society for Geomechanics, 2010. Ground characterization and coherent procedure for the determination of excavation and support during design and construction. Ground characterization and coherent procedure for the determination of excavation and support during design and construction.
- Goricki, W., Schubert, G., Riedmueller, G., 2004. New Developments for the design and construction of tunnels in complex rock masses. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 41(3), CD-ROM.
- Goricki A., Rachaniotis N., Hoek E., Marinos P., Tsotsos S. and Schubert W., 2006. Support Decision criteria for tunnels in fault zones. Felsbau, 24(5).
- Goodman, R., 1993. Engineering Geology. Publ. John Wiley & Sons, Inc.
- Hoek, E., 1994. Strength of rock and rock masses. ISRM News Journal, 2(2), pp. 4-16.
- Hoek, E., 1999. Putting numbers to geology - an engineers's viewpoint. The Second Glossop Lecture. Quarterly Journal of Engineering Geology, 32(1), pp. 1-19.
- Hoek, E., 1999. Support for very weak rock associated with faults and shear zones. In: Villaescusa, E., Windsor, C.R. and Thompson, A.G. (eds). Rock support and reinforcement practice in mining, pp. 19-32.



## ***Βιβλιογραφία - Προδιαγραφές***

- Hoek, E., 2000. Big tunnels in bad rock. 2000 Terzaghi lecture. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127(9), pp. 726-740.
- Hoek, E., 2007. Practical Rock Engineering. Notes on Internet ([www.rocscience.com/hoek/hoek.asp](http://www.rocscience.com/hoek/hoek.asp)).
- Hoek, E., Brown, E.T., 1980. Underground excavations in rock. Institution of Mining and Metallurgy, London.
- Hoek, E., Brown, E.T., 1997. Practical estimates of rock mass strength. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 34(8), pp. 1165-1186.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., Corkum, B., 2002. Hoek - Brown failure criterion - 2002 edition. In: Bawden H.R.W., Curran, J., Telesnicki, M. (eds). Proceedings of NARMS-TAC 2002, Toronto, pp. 267-273.
- Hoek, E., Kaiser, P.K., and Bawden, W.F., 1995. Support of underground excavations in hard rock. Rotterdam, Balkema.

## ***Βιβλιογραφία - Προδιαγραφές***

- Hoek, E., Marinos, P., 2000. Predicting tunnel squeezing in weak heterogeneous masses. *Tunnels and Tunnelling International*, Part 1—November Issue 2000, pp. 45-51; Part 2—December 2000, pp. 34-36.
- Hoek, E., Marinos P., 1998-2006. Panel of experts Egnatia Reports.
- Hoek, E., Marinos, P. and Benissi, M., 1998. Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist Formation. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 57(2), pp. 151-160.
- Hoek, E., Marinos, P., and Marinos, V., 2004. Characterization and engineering properties of tectonically undisturbed but lithologically varied sedimentary rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42(2), pp. 277-285.
- Hoek, E., Marinos, P., Kazilis, N., Agistalis, G., Rahaniotis, N., Marinos, V., 2006. Greece's Egnatia highway tunnels. *Tunnels and Tunnelling International*, September issue, pp. 32-35.

## ***Βιβλιογραφία - Προδιαγραφές***

- Loew, S., Ziegler, H-J., Keller, F., 2000. Alptransit: Engineering Geology of the world's longest tunnel system.. In: Proceedings of the GeoEng2000 at the international conference on geotechnical and geological engineering, Melbourne, Technomic publishers, Lancaster, pp. 927-932.
- Lunardi, P., 2000. The design and construction of tunnels using the approach based on the analysis of controlled deformations in rocks and soils. Tunnels and Tunnelling International, May 2000, pp. 3-30. Available at [www.rocksoil.com](http://www.rocksoil.com).
- Marinos, G., 1974. Geology of Orthrys and issues on its ophiolites. Ann Géol d Pays Helléniques, University of Athens, 26, pp. 118-148.
- Marinos, P., 2005. Experiences in tunnelling through karstic rocks. Proceedings of International Conference CVIJIC 2005: water resources and environmental problems in Karst, pp. 617-644.
- Marinos, P., Hoek, E., 2000. GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation. In: Proceedings of the GeoEng2000 at the international conference on geotechnical and geological engineering, Melbourne, Technomic publishers, Lancaster, pp. 1422-1446.

## ***Βιβλιογραφία - Προδιαγραφές***

- **Marinos, P., Hoek, E., Marinos, V., 2005. Variability of the engineering properties of rock masses quantified by the geological strength index: the case of ophiolites with special emphasis on tunnelling. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 65(2), pp. 129-142.**
- **Marinos, P., Hoek, E., Rahaniotis, N., Agistalis, G., Marinos, V., 2006. The tunnels of Egnatia Highway. Experiences in a variety of rock masses under complex geological conditions. Πρακτικά 5ου Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, Ξάνθη 2006.**
- **Marinos, V., Marinos, P., Hoek, E., 2005. The geological strength index: applications and limitations. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 64, pp. 55-65.**
- **Muller, L., 1988. The influence of engineering geology and rock mechanics in tunnelling. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 38, pp. 5-13.**
- **Palmstrom, A., Stille, H., 2007. Ground behaviour and rock engineering tools for underground excavations. Tunnelling and Underground Space Technology, 27, pp. 363-376.**

## ***Βιβλιογραφία - Προδιαγραφές***

- Potsch, M., Schubert, W., Goricki, A., Steidl, A., 2004. Determination of Rock Mass Behaviour Types - a Case Study. EUROCK 2004 and 53th Geomechanics Colloquium, Schubert ed., VGE publ.
- Schubert, W., 1996. Dealing with squeezing conditions in Alpine tunnels. Rock Mechanics and Rock Engineering, 29(3), pp. 145-153.
- Russo, G., 1994. Some considerations on the applicability of major geomechanical classifications to weak and complex rocks in Tunnelling. GEAM, March issue, pp. 63-70.
- Schubert, W. and Riedmueller, G., 2000. Tunnelling in fault zones-state of the art in investigation and construction. Felsbau 18(2), pp. 8-17.
- Καββαδάς Μ., 2005. Σημειώσεις σχεδιασμού υπογείων έργων. Εκδόσεις ΕΜΠ.
- Μαρίνος Β. (2011). Παρουσιάσεις μαθήματος «Γεωλογικές και Περιβαλλοντικές Μελέτες Τεχνικών Έργων».
- Μουντράκης, Δ.Μ., 2010. Γεωλογία της Ελλάδας. UNIVERSITY STUDIO PRESS. Θεσσαλονίκη.
- Παπανικολάου, Δ.Ι., 2003. Γεωλογία της Ελλάδας. Εκδόσεις Πανεπιστημίου Αθηνών.