

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ

2^ο Μάθημα “Ιδιότητες Άρρηκτου Βράχου”

Διδάσκων: Β. Μαρίνος, Επ. Καθηγητής

- Γεωτεχνικός Τομέας, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ

marinosv@civil.ntua.gr

Ο ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

Απαιτεί την γνώση της ποιότητας του γεωυλικού μέσα στο οποίο θα πραγματοποιηθεί η κατασκευή

ΑΠΑΡΑΙΤΗΤΑ ΛΟΙΠΟΝ

- ✓ Γνώση του προσομοιώματος του γεωυλικού *(που απαραίτητα απαιτεί την προηγούμενη γνώση του γεωλογικού προσομοιώματος)*
- ✓ Γεωτεχνικές παράμετροι του γεωυλικού όπως ορίστηκε από το προσομοίωμά της

ΓΕΩΥΛΙΚΟ: ΕΔΑΦΟΣ – ΒΡΑΧΟΣ – ΒΡΑΧΟΜΑΖΑ

ΤΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ, ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

- I. Βράχος – Ασυνέχειες : Ποσοτική περιγραφή**
- II. Άρρηκτος Βράχος: Ιδιότητες**
- III. Βραχόμαζα - Χαρακτηρισμός: ιδιότητες**

ΤΟ ΓΕΩΥΛΙΚΌ: ΒΡΆΧΟΣ - ΒΡΑΧΌΜΑΖΑ

- ▶ Άρρηκτος βράχος: Βράχος χωρίς ασυνέχειες
- ▶ Βραχόμαζα: Σύνολο τεμαχών – μπλοκ βράχων διαχωριζόμενων από ασυνέχειες

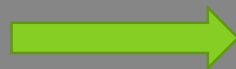
- ◎ Τα τεχνικά έργα σχεδόν κατά κανόνα κατασκευάζονται επί ή εντός κερματισμένου-διαταραγμένου βραχώδους υλικού (βραχόμαζα) και όχι σε άρρηκτο βράχο.
- ◎ Συνεπώς, τελικός στόχος οι ιδιότητες (διατμητική αντοχή και παραμορφωσιμότητα) της βραχόμαζας.

Η αντοχή των περισσότερων πετρωμάτων >> επιβαλλόμενη τάση από τα τεχνικά έργα

Εξαιρέσεις: - ασθενή αργιλικά πετρώματα
- πολύ αποσαθρωμένα
- ρωγματωμένα

Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (q_u , UCS, σ_c)

- Σκυρόδεμα $\approx 15-35$ MPa
- Κρυσταλλικά με πορώδες $< 1\% \Rightarrow \sigma_c > 100$ MPa
- Ιζηματογενή με πυκνότητα < 23 kN/m³ $\Rightarrow \sigma_c < 70$ MPa



Μείωση αντοχής

Βασάλτης, γρανίτης χαλαζίτης, γνεύσιος, ψαμμίτης, ασβεστόλιθος, μάρμαρο, σχιστόλιθος, ιλυόλιθος, μάργα, αργιλικός σχιστόλιθος, αργιλόλιθος, γύψος, ορυκτό αλάτι, πολύ αποσαθρωμένα πετρώματα

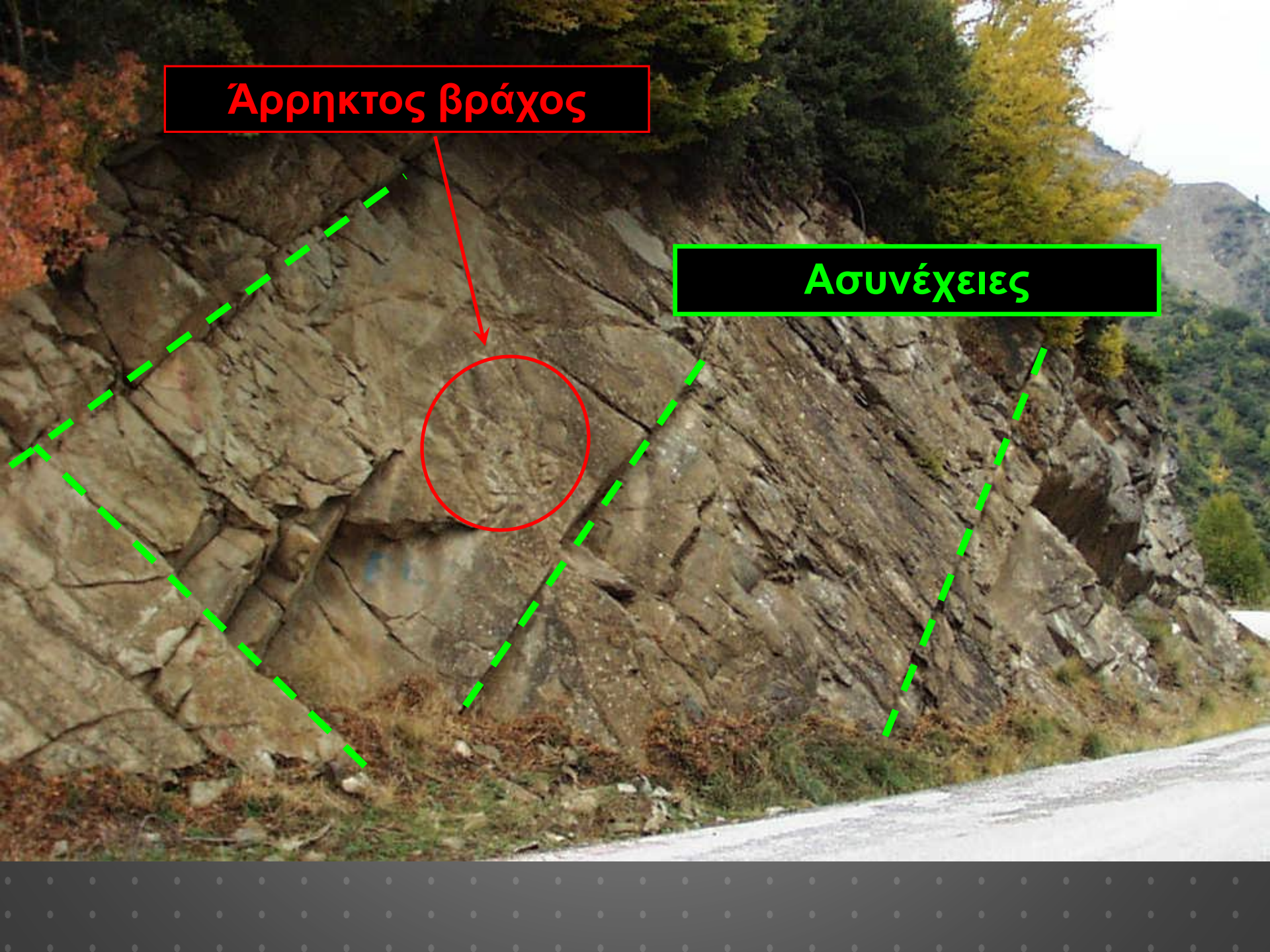
Ποιο είναι το υλικό που μελετάμε ?

Βραχόμαζα

- ✘ Άρρηκτο βράχο
- ✘ Ασυνέχειες

Άρρηκτος βράχος

ΑΣΥΝΕΧΕΙΕΣ

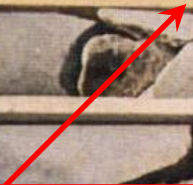


ΣΩΤΗΡΟΠΟΥΛΟΣ & ΣΥΝΕΡΓΑΤΕΣ Α.Τ.Ε.
ΕΡΓΟ: ΤΜΗΜΑ 4.1.3.s ΠΑΝΑΓΙΑ - ΓΡΕΒΕΝΑ
ΓΕΩΤΡΗΣΗ: Γ2 ΒΑΘΟΣ: από 18,70 μ. έως 23,00 μ.

Ασυνέχεια



Άρρηκτος βράχος



ΣΩΤΗΡΟΠΟΥΛΟΣ & ΣΥΝΕΡΓΑΤΕΣ Α.Τ.Ε.

ΕΡΓΟ: ΤΜΗΜΑ 4.1.3.5 ΠΑΝΑΓΙΑ - ΓΡΕΒΕΝΑ

ΓΕΩΤΡΗΣΗ: Γ2 ΒΑΘΟΣ από 14,20 μ. έως 18,70 μ.

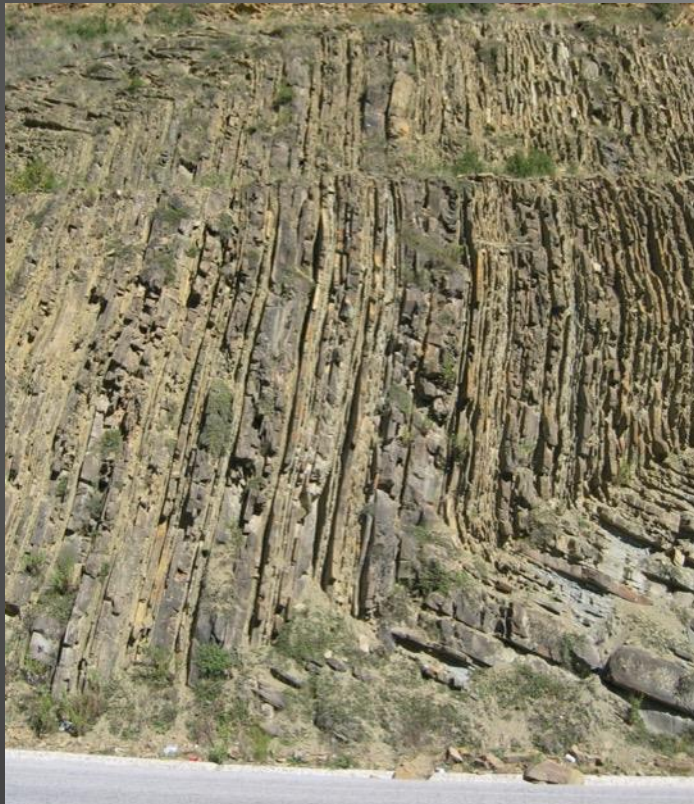
Ασυνέχειες

Άρρηκτος βράχος



ΒΡΑΧΟΜ'ΑΖΑ:

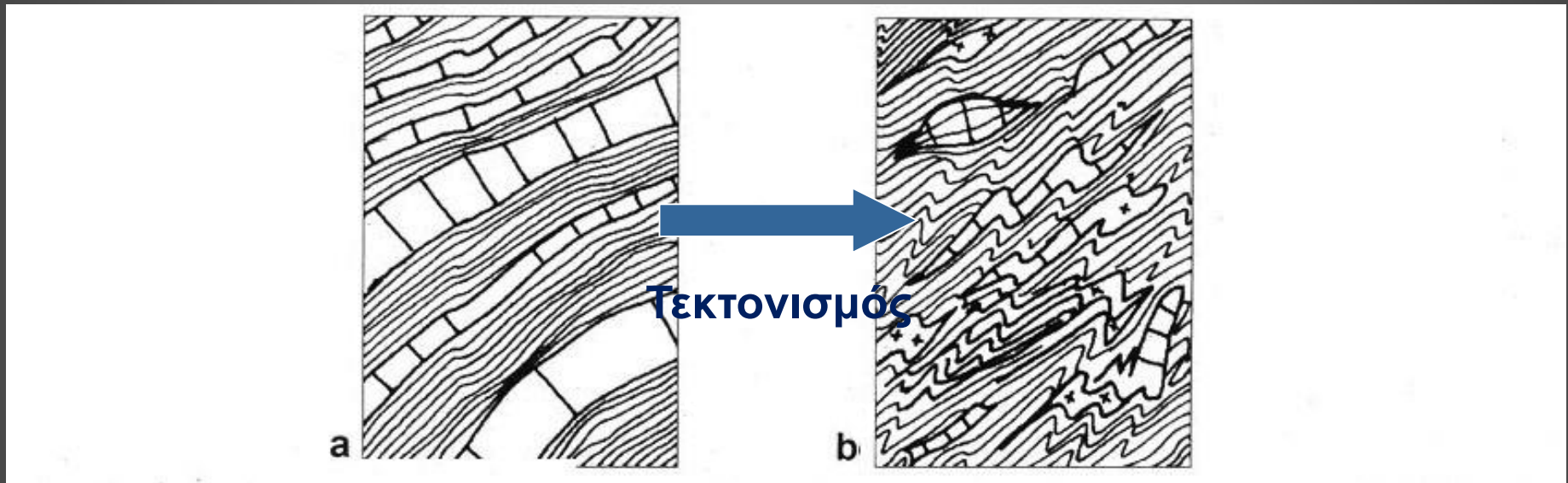
ΆΡΡΗΚΤΑ ΤΕΜΑΧΗ + ΑΣΥΝΕΧΕΙΕΣ
(ΑΠ'Ο ΤΗΝ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ ΚΑΙ
ΑΡΧΙΚΗ ΔΟΜΗ-ΣΤΡΩΜΑΤΩΣΗ)





Τεκτονική καταπόνηση:

Η αντοχή βραχομάζας μειώνεται λόγω αλλαγής δομής, ποιότητας ασυνεχειών ή και διάτμησης άρρηκτου βράχου



Βραχομάζα: Ομοιογενής ή Ετερογενής



Για να εκτιμήσουμε την αντοχή της πρέπει να ξέρουμε πρώτα τις ιδιότητες του άρρηκτου βράχου που αποτελείται

«ΤΕΧΝΙΚΗ ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΒΡΑΧΟΥ-ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ»

1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ

Τεχνική περιγραφή βραχωδών δειγμάτων

- i. Γεωλογική περιγραφή
- ii. Κερματισμός
- iii. Βαθμός αποσαθρώσεως
- iv. Δομή του πετρώματος (στρώση, σχιστότητα, πτύχωση)
- v. Ασυνέχειες του πετρώματος
- vi. Χρώμα

ΤΕΧΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ

- ▶ Τεχνική περιγραφή βραχωδών δειγμάτων
 - ▶ Παράδειγμα:

Μετρίως ασθενείς έως μετρίως ισχυρές, λεπτοστρωματώδεις, τεφρόφαιου χρώματος, εναλλαγές λεπτόκοκκου Μεταψαμμίτη-Μεταϊλιολίθου (Αθηναϊκός Σχιστόλιθος-Ανώτερη Ενότητα). Σχηματισμός μετρίως αποσαθρωμένος, ασυνέχειες με ασβεστιτικό υλικό πλήρωσης. Ο σχηματισμός εμφανίζεται τεκτονικά καταποννημένος και με μέτριο κερματισμό.

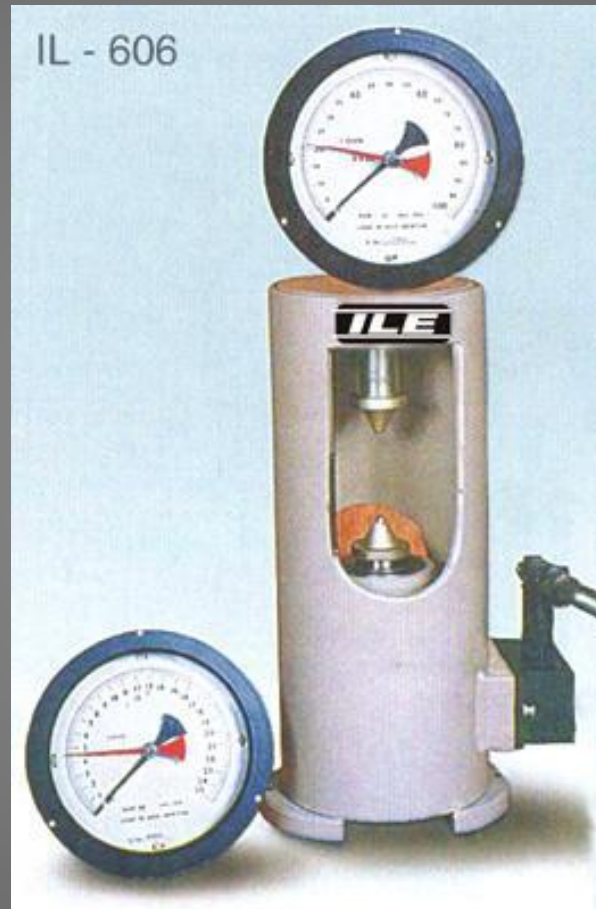
Αντοχή του πετρώματος (άμεση εκτίμηση στην ύπαιθρο)

- Χρήση του γεωλογικού σφυριού
- Χρήση σφυριού SCHMIDT τύπου L (επί ασυνεχειών)
- Δοκιμή σημειακής φορτίσεως (Point load test)

ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗ ΘΛΪΨΗ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

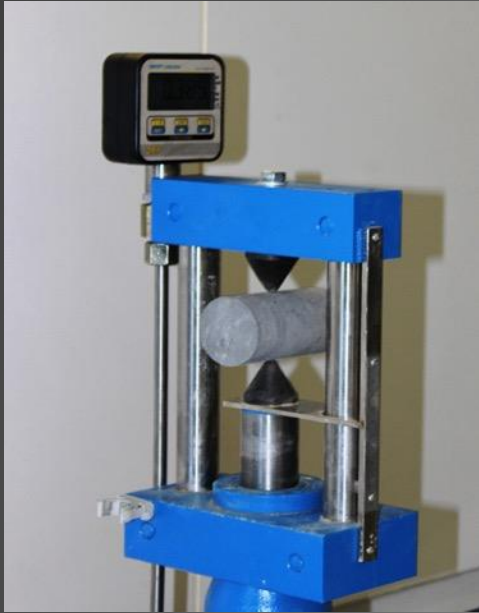
Όρος (GR)	Όρος (EN)	Εκτίμηση πεδίου	Αντοχή σε θλίψη (MPa)
Πολύ ασθενές	Very weak	Τεμάχιο μεγέθους χαλικιού συνθλίβεται μεταξύ αντίχειρα και δακτύλου	<1,25
Ασθενές	Weak	Τεμάχιο μεγέθους χαλικιού σπάει στη μέση με ισχυρή πίεση χεριού	1,25 - 5
Μετρίως Ασθενές	Moderately weak	Μόνο λεπτές πλάκες, γωνίες, άκρες μπορούν να σπάσουν με ισχυρή πίεση χεριού	5 - 12,5
Μετρίως Ισχυρό	Moderately strong	Κρατημένο στο χέρι σπάει με κτυπήματα με γεωλογικό σφυρί	12,5 - 25
			25-50
Ισχυρό	Strong	Τοποθετημένο σε συμπαγή επιφάνεια σπάει με κτυπήματα με γεωλογικό σφυρί	50 - 100
Πολύ Ισχυρό	Very strong	Αποφλοιώνεται με δυνατά κτυπήματα με γεωλογικό σφυρί	100 - 200
Εξαιρετικά Ισχυρό	Extremely strong	Ηχεί με δυνατά κτυπήματα με γεωλογικό σφυρί. Σπάει μόνο με βαριοπούλα	>200

ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ ΣΗΜΕΙΑΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΕΩΣ (POINT LOAD TEST) ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ (ΠΟΣΟΤΙΚΗ) ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ



Δοκιμή σημειακής φορτίσεως (Point load test)

(ISRM, 1981,1985)



$$I_s = P/De^2$$

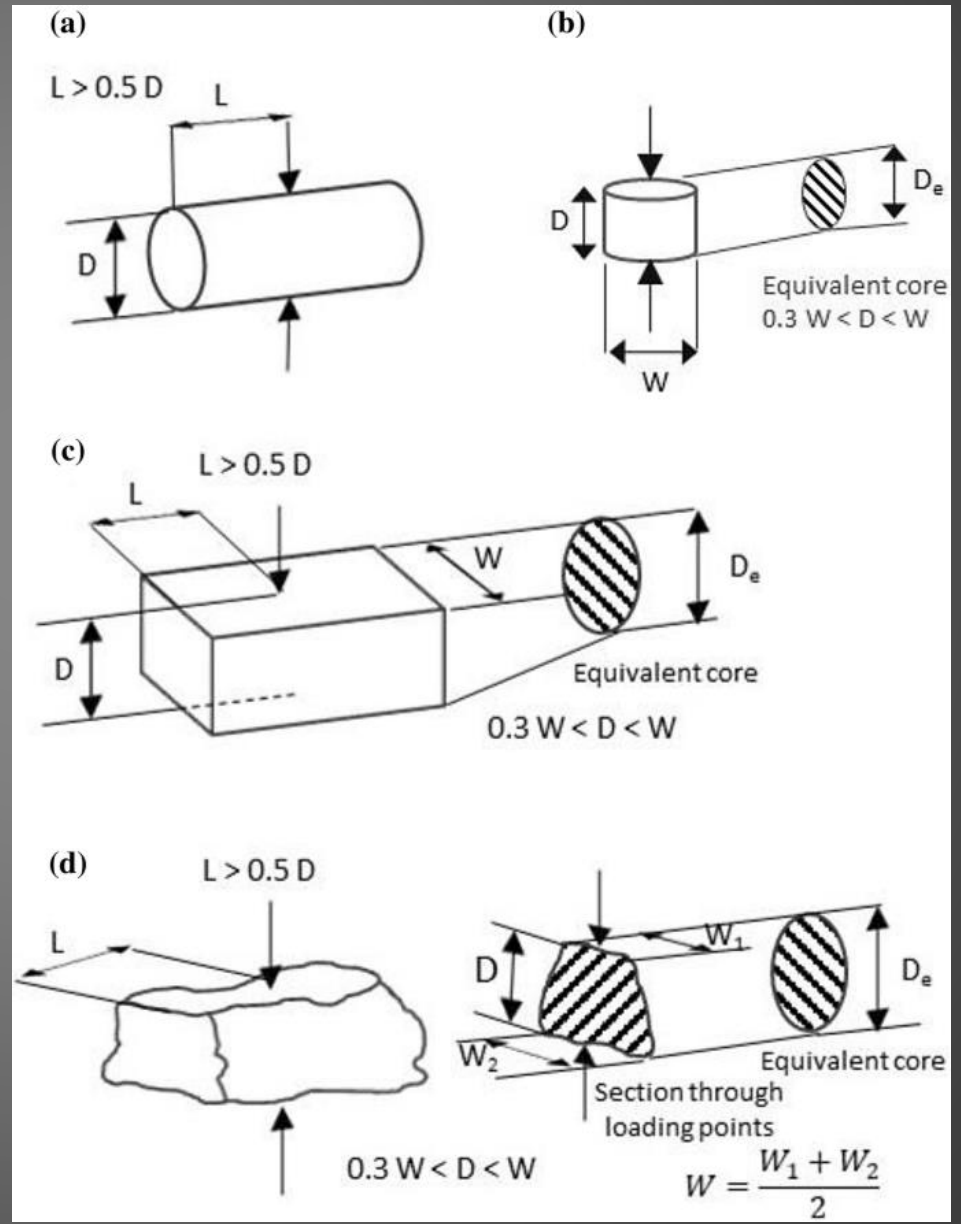
$$De^2 = 4 D W / \pi$$

$$I_{s(50)} = F I_s$$

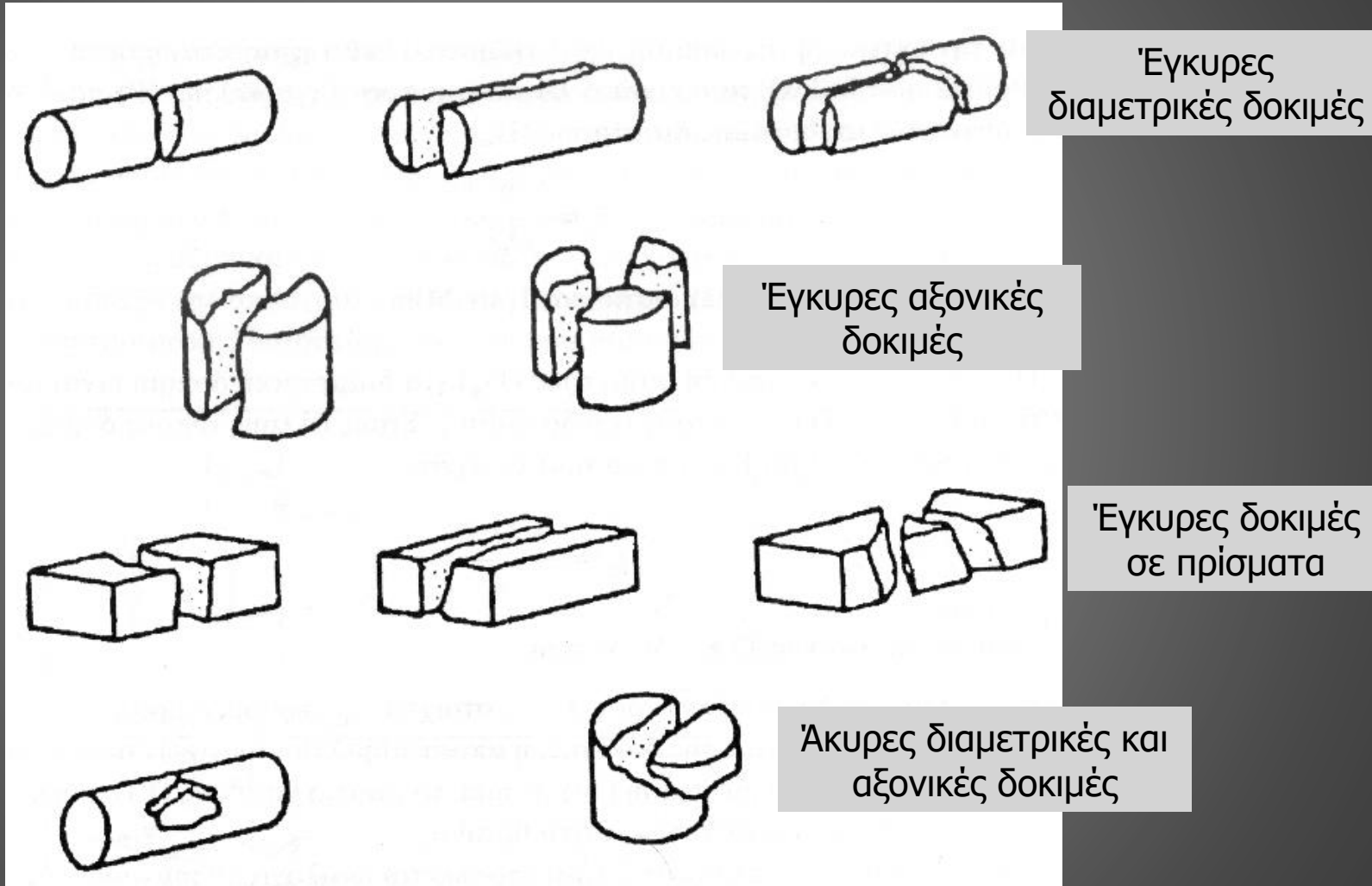
$$F = (De/50)^{0,45}$$

$$\sigma_c = k \cdot I_{s(50)}$$

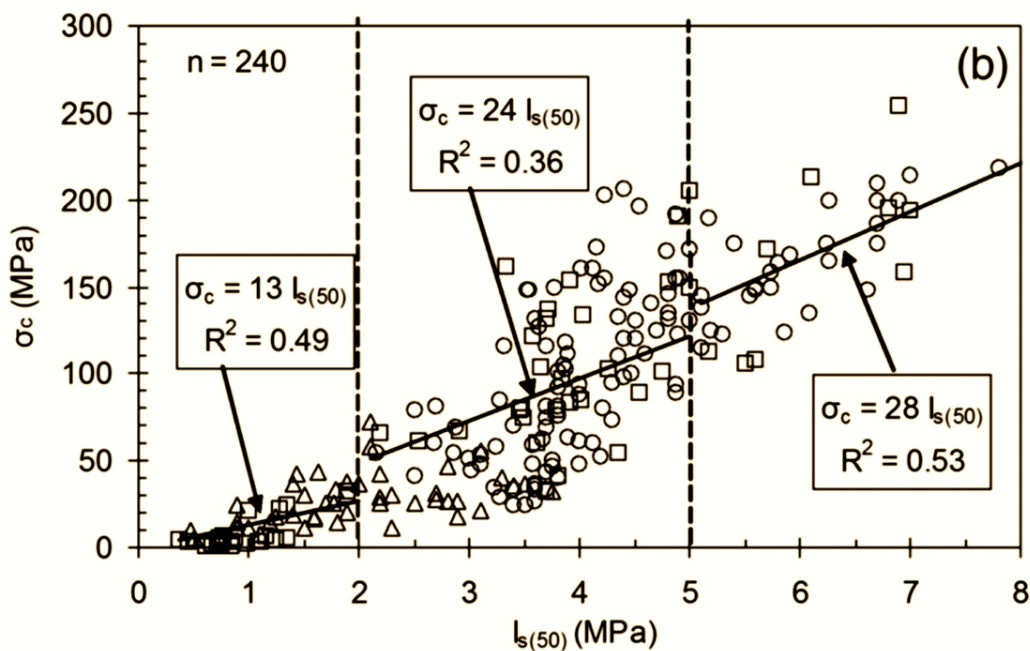
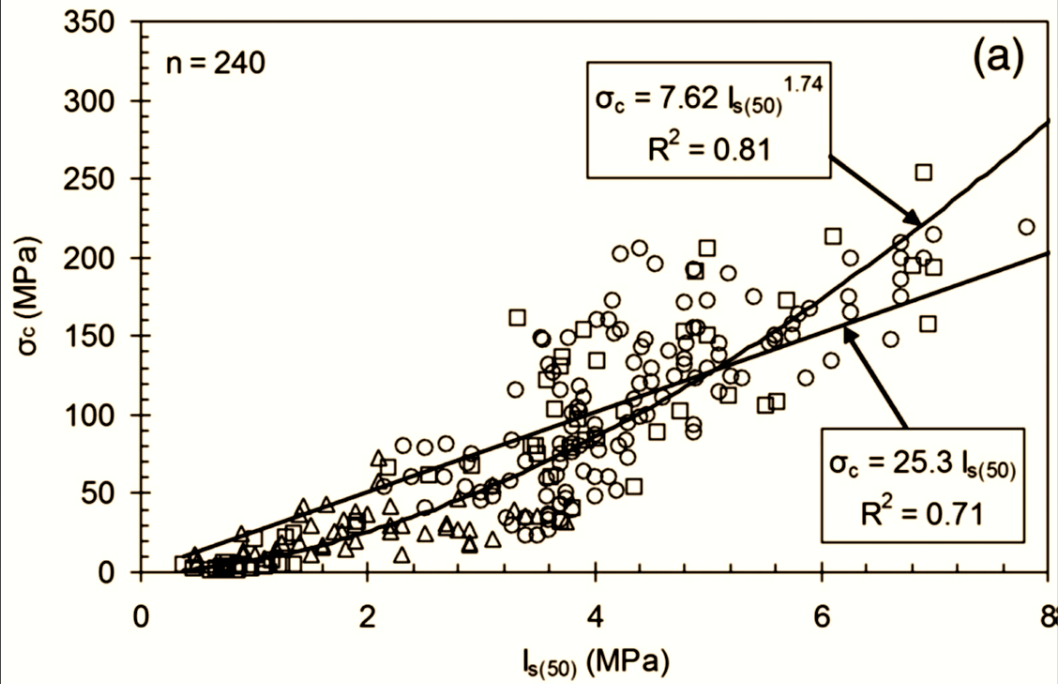
Συνήθως $k = 24$



Δοκιμή σημειακής φορτίσεως (Point load test)



Διαφάνεια από Γ. Τσιαμπάο



○ LIMESTONES △ MARLSTONES □ SANDSTONES

Έμμεσος προσδιορισμός της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη με βάση τον δείκτη σημειακής φόρτισης

Ασβεστόλιθοι, ψαμμίτες και σκληρές μάργες του Ελληνικού χώρου.

$k = 13$ για μαλακά πετρώματα

έως 28 για πολύ σκληρά

(Tsiambaos & Sabatakakis, 2004)

Πέτρωμα	$k = \sigma_c / I_{s(50)}$	Αναφορά
Διάφορα πετρώματα	24	Broch & Franklin (1972)
Ψαμμίτες	~23	Bieniawski (1975)
Ιζηματογενή	16	Read et al. (1980)
Βασάλτης	20	Read et al. (1980)
-	20-25	ISRM (1985)
Ψαμμίτης	~ 17	Vallejo et al. (1989)
Γρανίτες και τόφφοι	~ 13	Chou & Wong (1996)
Ιζηματογενή πετρώματα	13-28	Sabatakakis et al. (2008)
Σερπεντινίτες	~20	Diamantis et al (2009)
Διάφορα πετρώματα	14-24	Singh et al. (2012)
Ψαμμίτης	22	Singh et al. (2012)
ασβεστόλιθος	19	Singh et al. (2012)
Διάφορα πετρώματα	~15	Mishra & Basu (2013)

Διαφάνεια από Π. Νομικό

«ΤΕΧΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ

Αντοχή του πετρώματος (ακριβής υπολογισμός στο εργαστήριο)

- Δοκιμή μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής

ΤΕΧΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΕΡΜΑΤΙΣΜΟΥ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ RQD-SCR-TCR

Ολική πυρηνοληψία (TCR-Total Core Recovery):

Καλείται το συνολικό μήκος των κατηγοριών και εκφράζεται σε εκατοστιαία αναλογία του μήκους της δειγματοληψίας

Στερεή πυρηνοληψία(SCR-Solid Core Recovery):

Καλείται το συνολικό μήκος των κατηγοριών και εκφράζεται σε εκατοστιαία αναλογία του μήκους της δειγματοληψίας.

Δείκτης ποιότητας του πετρώματος (RQD - Rock Quality Designation):

Κατά την μέθοδο αυτή όλοι οι πυρήνες μήκους μεγαλύτερου των 10cm (αθροίζονται και το συνολικό τους μήκος εκφράζεται σαν εκατοστιαία αναλογία του μήκους της πυρηνοληψίας).

ΔΕΪΚΤΗΣ ΚΕΡΜΑΤΙΣΜΟΎ ΒΡΑΧΌΜΑΖΑΣ

RQD – TCR - SCR

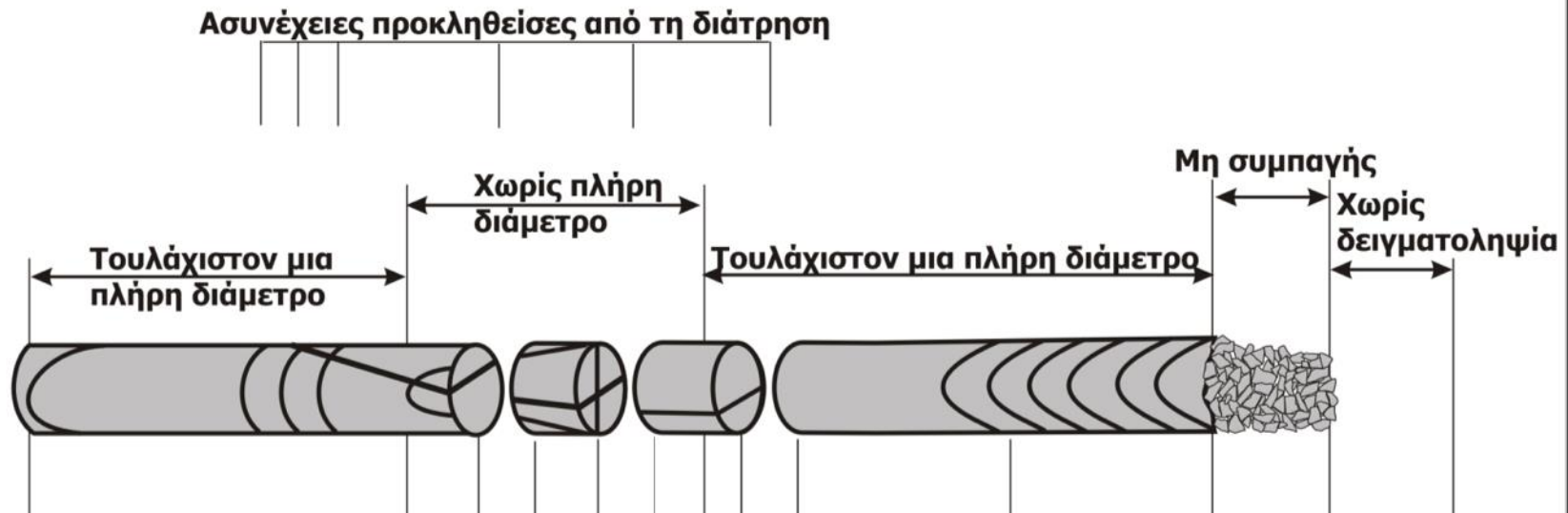
Η βαθμονόμηση αυτή της βραχόμαζας (κυρίως του δείκτη ποιότητας RQD) αποτελεί από τις βασικότερες **πρώτες και αδρές** πληροφορίες για την ποιότητα του γεωυλικού και συνήθως γίνεται κατά τη δειγματοληψία γεωτρήσεως.

Κατά τη διάτρηση ενός πετρώματος, το υλικό που περνάει μέσα στον δειγματολήπτη χωρίζεται σε:

- α) Πυρήνες μήκους μεγαλύτερου των 10 cm
- β) Πυρήνες μήκους μικρότερου των 10 cm
- γ) Θραύσματα του πετρώματος
- δ) Υλικό που έχει χαθεί κατά τη δειγματοληψία.

ΔΕΪΚΤΗΣ ΚΕΡΜΑΤΙΣΜΟΎ ΒΡΑΧΌΜΑΖΑΣ

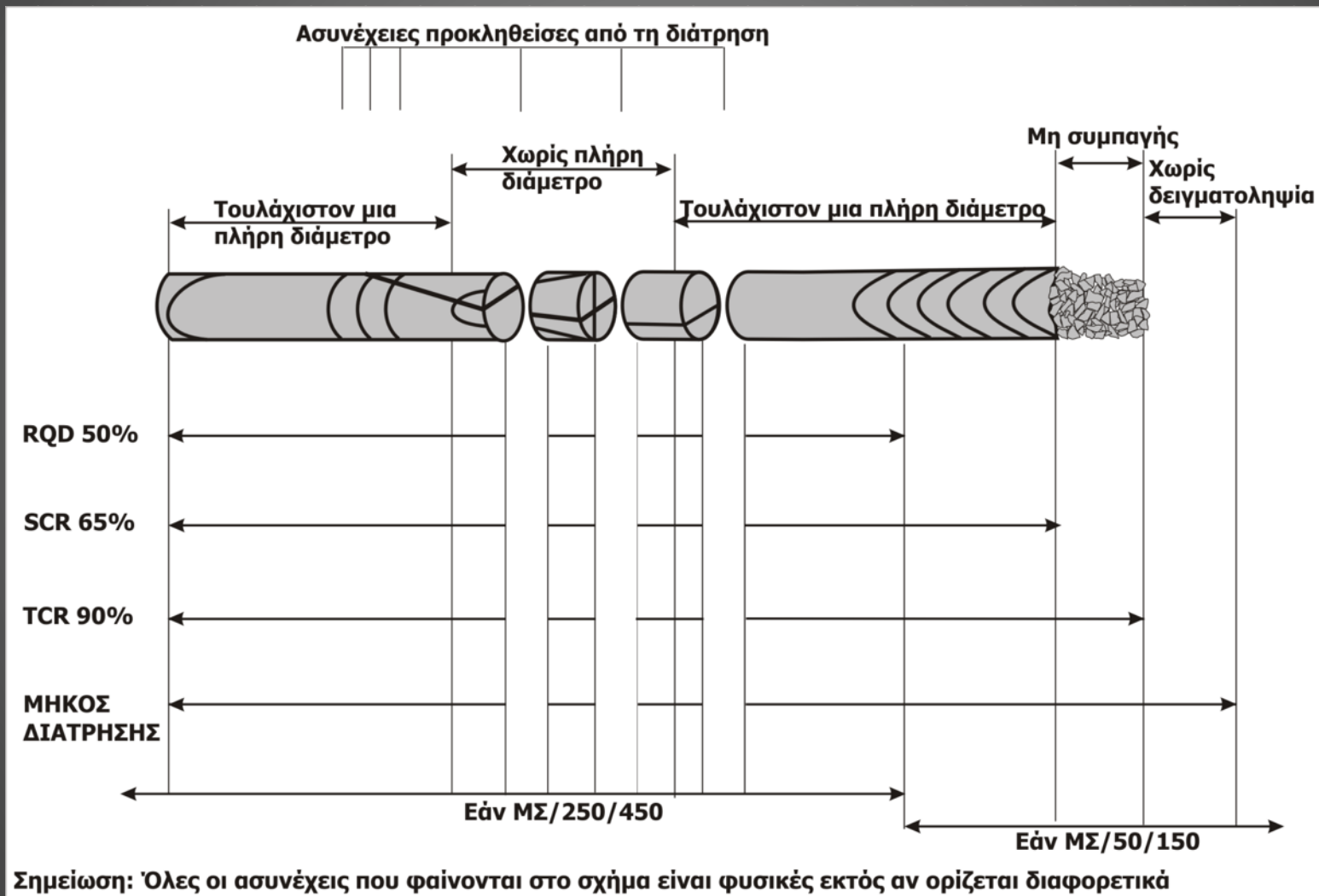
RQD – TCR - SCR



- α) Πυρήνες μήκους μεγαλύτερου των 10 cm
- β) Πυρήνες μήκους μικρότερου των 10 cm
- γ) Θραύσματα του πετρώματος
- δ) Υλικό που έχει χαθεί κατά τη δειγματοληψία.

ΔΕΪΚΤΗΣ ΚΕΡΜΑΤΙΣΜΟΎ ΒΡΑΧΌΜΑΖΑΣ

RQD – TCR - SCR



Σχηματική απεικόνιση – ορισμοί των RQD, TCR και SCR.

ΔΕΪΚΤΗΣ ΚΕΡΜΑΤΙΣΜΟΥ RQD



ΔΕΪΚΤΗΣ ΚΕΡΜΑΤΙΣΜΟΎ ΒΡΑΧΏΜΑΖΑΣ

RQD – TCR - SCR



$$TCR = \frac{40 + 6.5 + 5 + 59 + 8.5 + 11 + 46}{200} \times 100 = 88\%$$

$$SCR = \frac{40 + 6.5 + 59 + 11 + 46}{200} \times 100 = 81.2\%$$

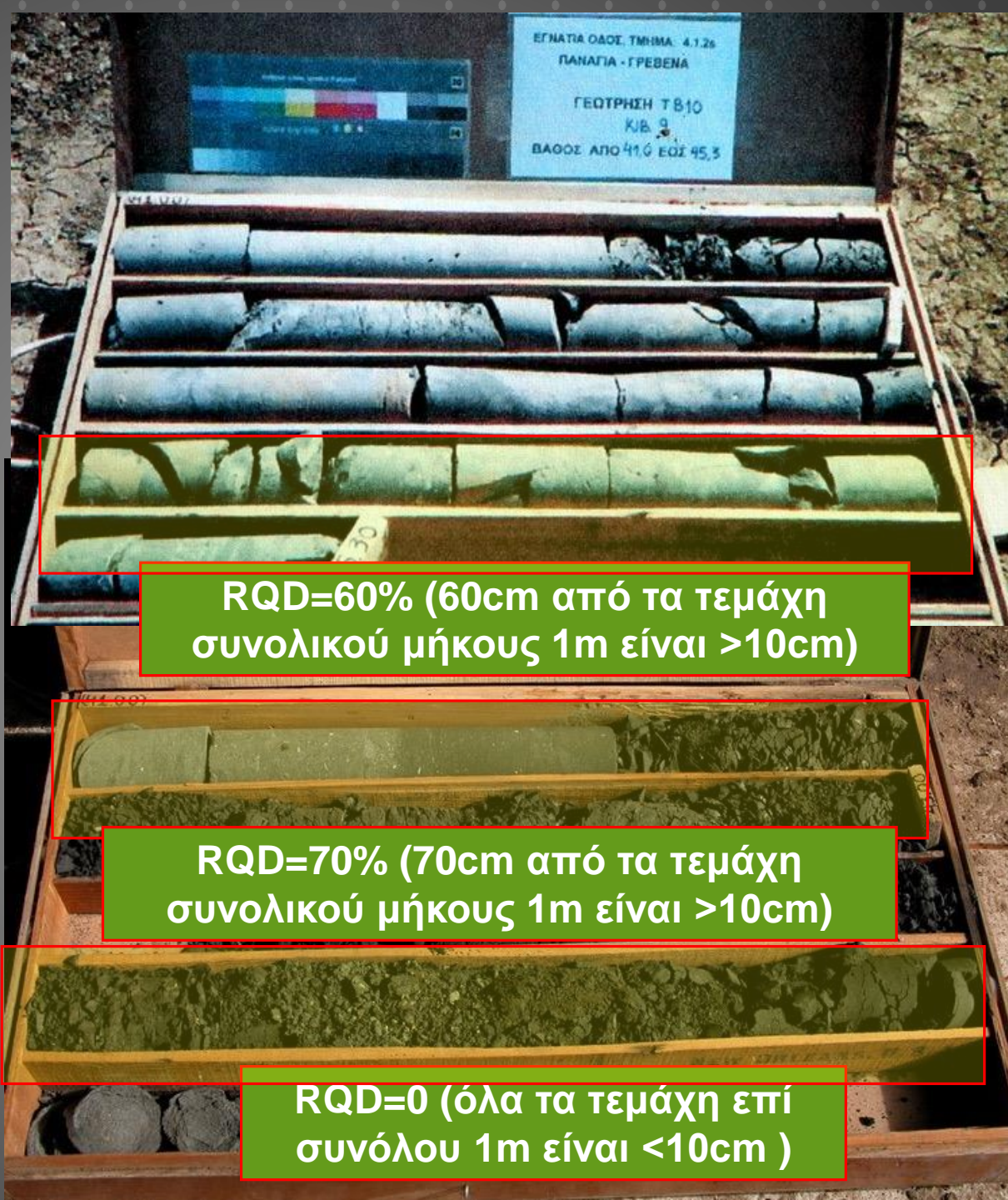
$$RQD = \frac{40 + 59 + 46}{200} \times 100 = 72.5\%$$

Είναι σωστό;
Βρείτε το λάθος

Παράδειγμα υπολογισμού RQD, TCR και SCR.

Εμφάνιση πυρήνων
γεώτρησης μολασσικού
πετρώματος (εναλλαγές
ψαμμίτη-ιλυολίθου) αμέσως
μετά τη δειγματοληψία.

Εμφάνιση των ίδιων
πυρήνων που
εμφανίζεται στο πάνω
Σχήμα αλλά μετά από 6
μήνες, στην αποθήκη
που εφυλάσσοντο. Ο
ψαμμίτης παραμένει
ακέραιος αλλά οι
ιλυόλιθοι εμφανίζουν
σχάση ακολουθούμενη
από κατάρρευση
(διασπορά) του αρχικού
υλικού ιλυολιθικού
πετρώματος.



ΤΕΧΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΠΟΣΑΘΡΩΣΗΣ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ

Κατηγορία άρρηκτου πετρώματος	Περιγραφή
Υγιές	Χωρίς ίχνη αποσάθρωσης του υλικού
Αποχρωματισμένο	Το χρώμα της πρωτογενής υγιής βραχόμαζας έχει αλλάξει. Ο βαθμός της αλλαγής από το πρωτογενές χρώμα θα πρέπει να υποδεικνύεται. Εάν η αλλαγή του χρώματος είναι περιορισμένη σε συγκεκριμένα ορυκτά αυτό θα πρέπει να αναφέρεται
Εξαλλοιωμένο	Πλήρως αποσαθρωμένο υλικό που μπορεί να χαρακτηριστεί ως έδαφος, η πρωτογενής δομή της ακόμη διατηρείται αλλά μερικά ή όλα τα ορυκτά έχουν εξαλλοιωθεί
Αποδιοργανωμένο	Πλήρως αποσαθρωμένη υλικό που μπορεί να χαρακτηριστεί ως έδαφος, με την πρωτογενή δομή της να διατηρείται ακόμη. Η βραχόμαζα είναι ψαθυρή αλλά τα ορυκτά δεν είναι εξαλλοιωμένα

ΒΑΘΜΟΙ ΑΠΟΣΑΘΡΩΣΗΣ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ

Κατηγορία πετρώματος	Περιγραφή	Κατηγορία κατά την ISRM
Υγιές (F)	Χωρίς ίχνη αποσάθρωσης	I
Ελάχιστα αποσαθρωμένο	Η αποσάθρωση περιορίζεται στις επιφάνειες των ασυνεχειών	II
Ολίγον αποσαθρωμένο	Έντονη αποσάθρωση στις επιφάνειες των ασυνεχειών και ελαφρά αποσάθρωση στη μάζα του υλικού	III
Μετρίως αποσαθρωμένο	Εκτεταμένη αποσάθρωση στη μάζα του υλικού, χωρίς το υλικό να παρουσιάζει ευθρυπτότητα.	IV
Έντονα αποσαθρωμένο	Εκτεταμένη αποσάθρωση στη μάζα του υλικού, με τοπική ευθρυπτότητα του υλικού	V
Πλήρως αποσαθρωμένο	Πλήρης αποσάθρωση και μεγάλη ευθρυπτότητα του υλικού, με διατήρηση της υφής και της δομής	VI
Έδαφος	Η υφή και δομή του υλικού έχει καταστραφεί και το υλικό μπορεί να χαρακτηριστεί ως έδαφος (υπολειμματικός σχηματισμός)	-

“Ο γεωτεχνικός σχεδιασμός των έργων απαιτεί αριθμούς όσον αφορά την αντοχή και την παραμορφωσιμότητα του βράχου, τις επιτόπου τάσεις και την πίεση των πόρων. Οι αριθμοί αυτοί απαιτούνται για τον υπολογισμό της ευστάθειας των πρανών, την φέρουσα ικανότητα του εδάφους θεμελίωσης και την ικανότητα υποστήριξης στην εκσκαφή υπογείων έργων.....Οι αριθμοί αυτοί εξαρτώνται άμεσα από τις ιδιαιτερότητες του γεωλογικού υλικού”

E. Hoek, 1999

ΓΙΑΤΙ ΜΕΛΕΤΑΜΕ ΤΙΣ ΤΑΣΕΙΣ;

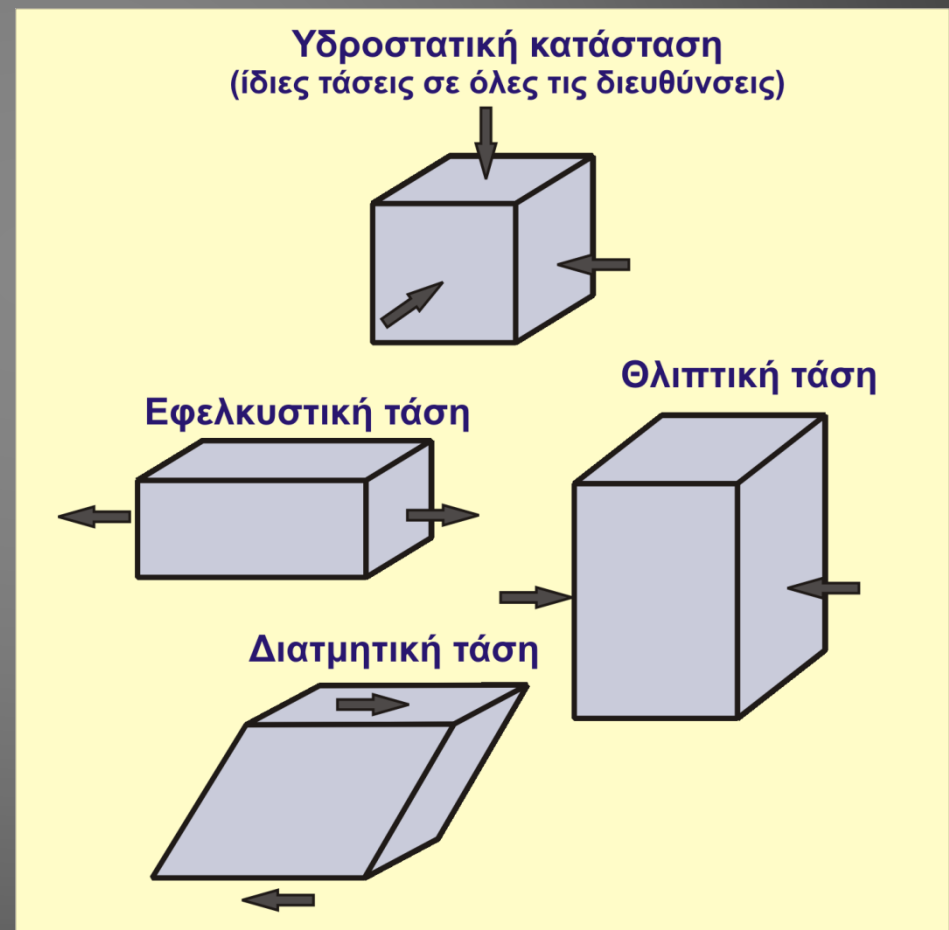
- ▶ Ανάλογα με το πώς κατανέμονται οι τάσεις στο έδαφος, όπου κατασκευάζονται τα τεχνικά έργα, εξαρτώνται οι παραμορφώσεις και οι αστοχίες που μπορεί να προκληθούν στα γεωυλικά. Υπολογίζονται είτε αναλυτικά είτε με αριθμητικές μεθόδους (π.χ. πεπερασμένα στοιχεία).

ΓΙΑΤΙ ΜΕΛΕΤΑΜΕ ΤΙΣ ΤΑΣΕΙΣ;

- ▶ Κατά την κατασκευή τεχνικών έργων οι τάσεις μεταβάλλονται δραματικά. Ο βράχος ο οποίος εκσκάπτεται, περιείχε πριν τάσεις και αυτές οι τάσεις πρέπει να παραληφθούν αλλού.
- ▶ Τα περισσότερα κριτήρια αστοχίας της βραχομηχανικής σχετίζονται με τη παραμορφωσιμότητα και την αντοχή του βράχου ή της βραχόμαζας και η ανάλυση αυτών περιλαμβάνει τις τάσεις.

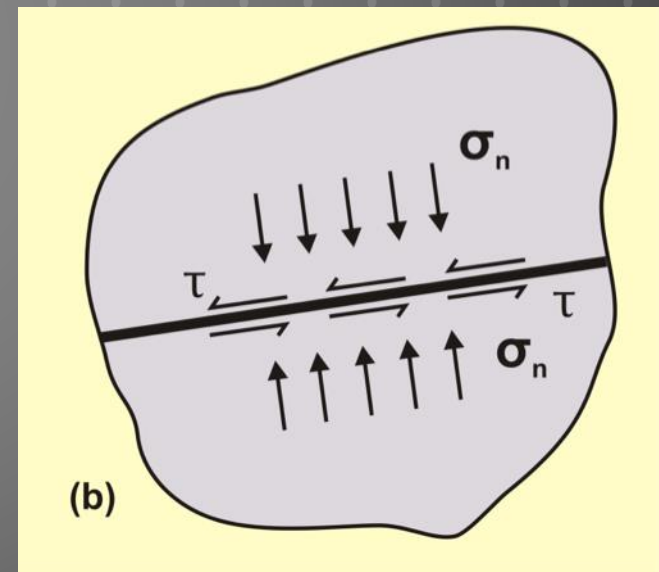
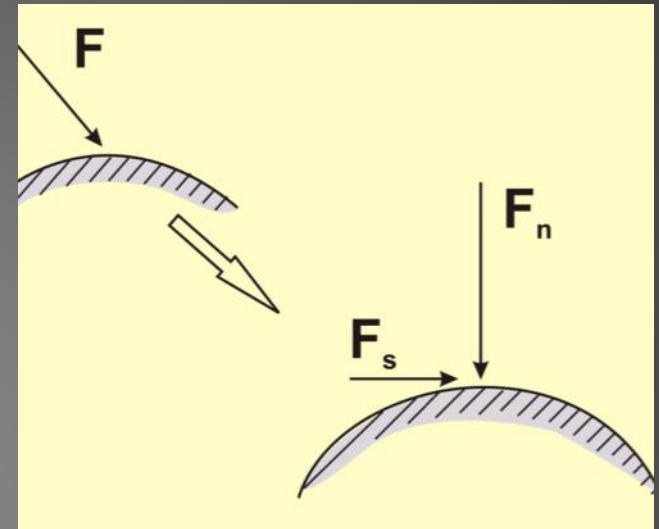
ΤΥΠΟΙ ΤΑΣΕΩΝ

- ▶ Υδροστατική τάση: Οι τάσεις είναι ίδιες σε όλες τις διευθύνσεις
- ▶ Θλιπτική (συμπιεστική) τάση
- ▶ Εφελκυστική τάση
- ▶ Διατμητική τάση

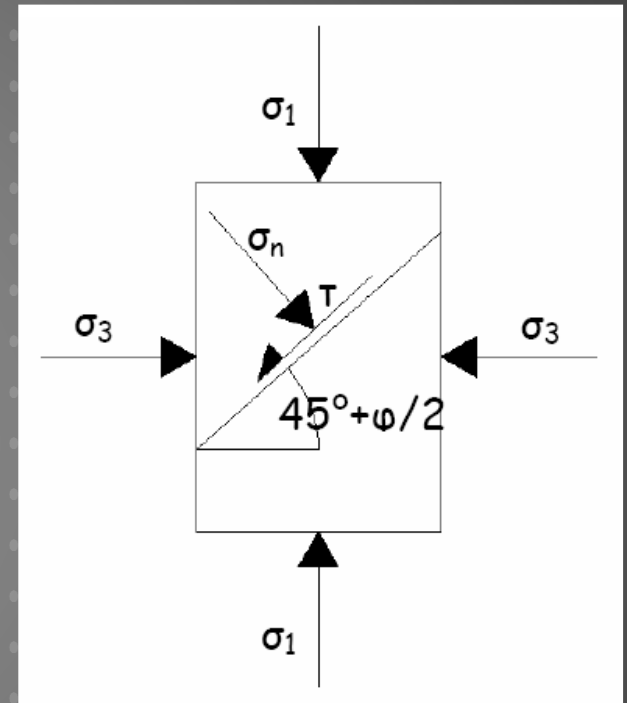
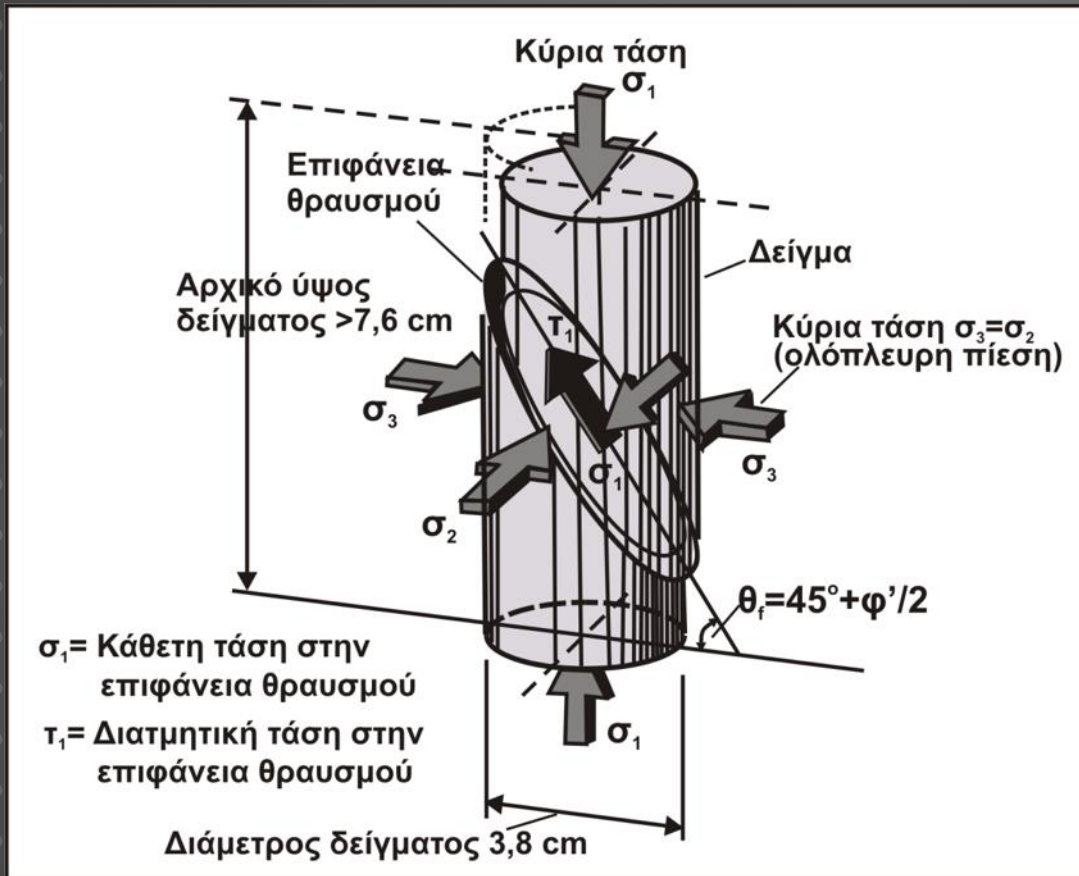


ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ

- ▶ Διατμητική τάση (τ): Η τάση που ασκείται εφαπτομενικά σε ένα επίπεδο
- ▶ Ορθή τάση (σ_n): Η τάση που ασκείται κάθετα σε ένα επίπεδο



Διατμητικές τάσεις

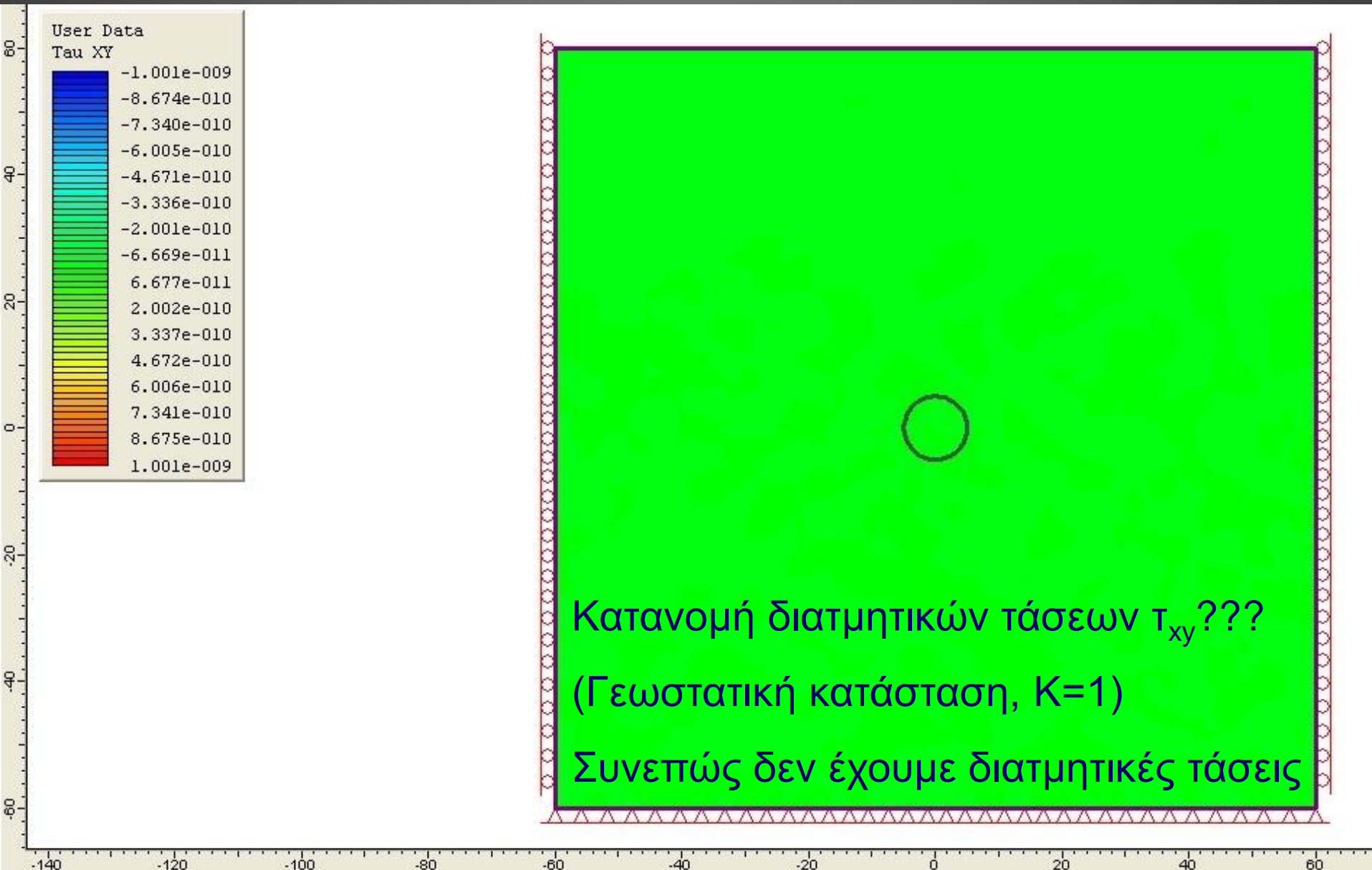


ΠΌΤΕ ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΝΤΑΙ ΟΙ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ;

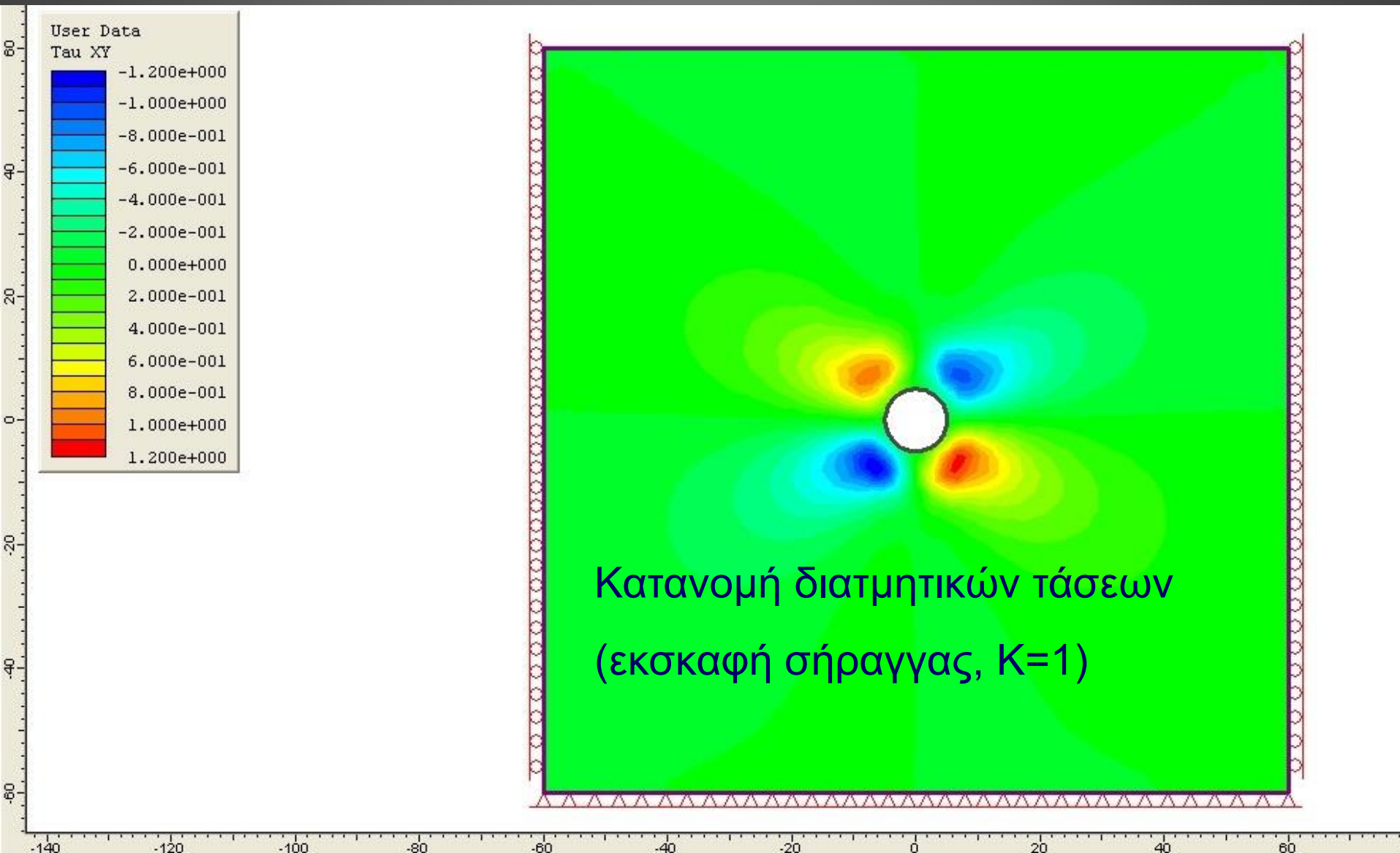
Αναπτύσσονται όταν οι κύριες τάσεις ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) δεν είναι ίσες μεταξύ τους, δηλαδή όταν η εντατική κατάσταση δεν είναι «υδροστατική».

- ▶ Γεωστατική κατάσταση βράχου, κάτω από οριζόντια εδαφική επιφάνεια και συντελεστή οριζόντιας τάσης $K \neq 1$ (κλασσική περίπτωση). Όσο μεγαλύτερη είναι η απόκλιση του K από την μονάδα τόσο μεγαλύτερες είναι οι διατμητικές τάσεις.
- ▶ Βραχώδες πρανές με κεκλιμένη επιφάνεια εδάφους. Όσο μεγαλύτερη είναι η κλίση της επιφανείας τόσο μεγαλύτερες και οι διατμητικές τάσεις.
- ▶ Κατά την εκτέλεση τεχνικών έργων (εκσκαφές, διάνοιξη σηράγγων, επιχώσεις, θεμελιώσεις, κλπ) οι διατμητικές τάσεις μεταβάλλονται (συνήθως αυξάνονται).

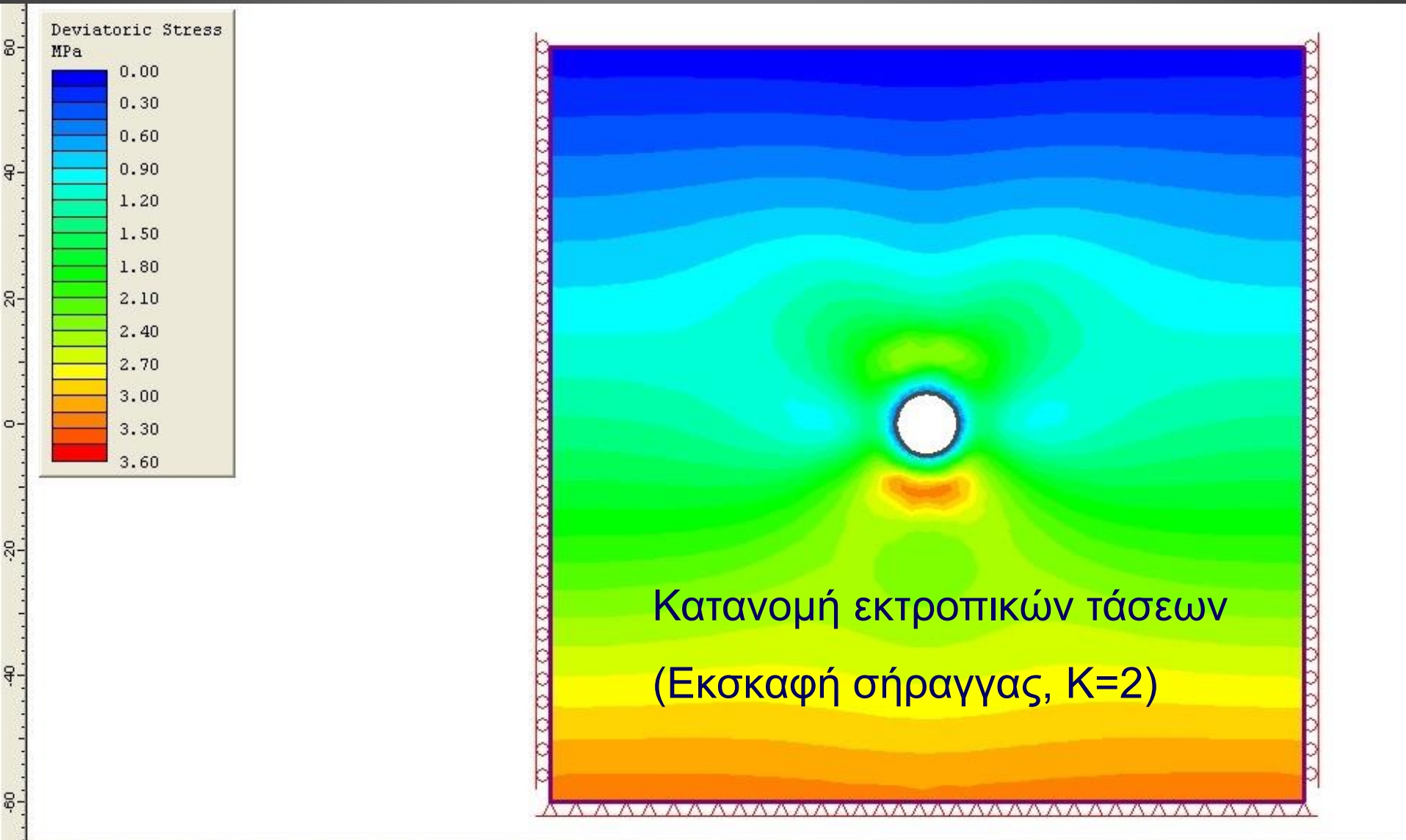
ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΩΝ ΤΑΣΕΩΝ



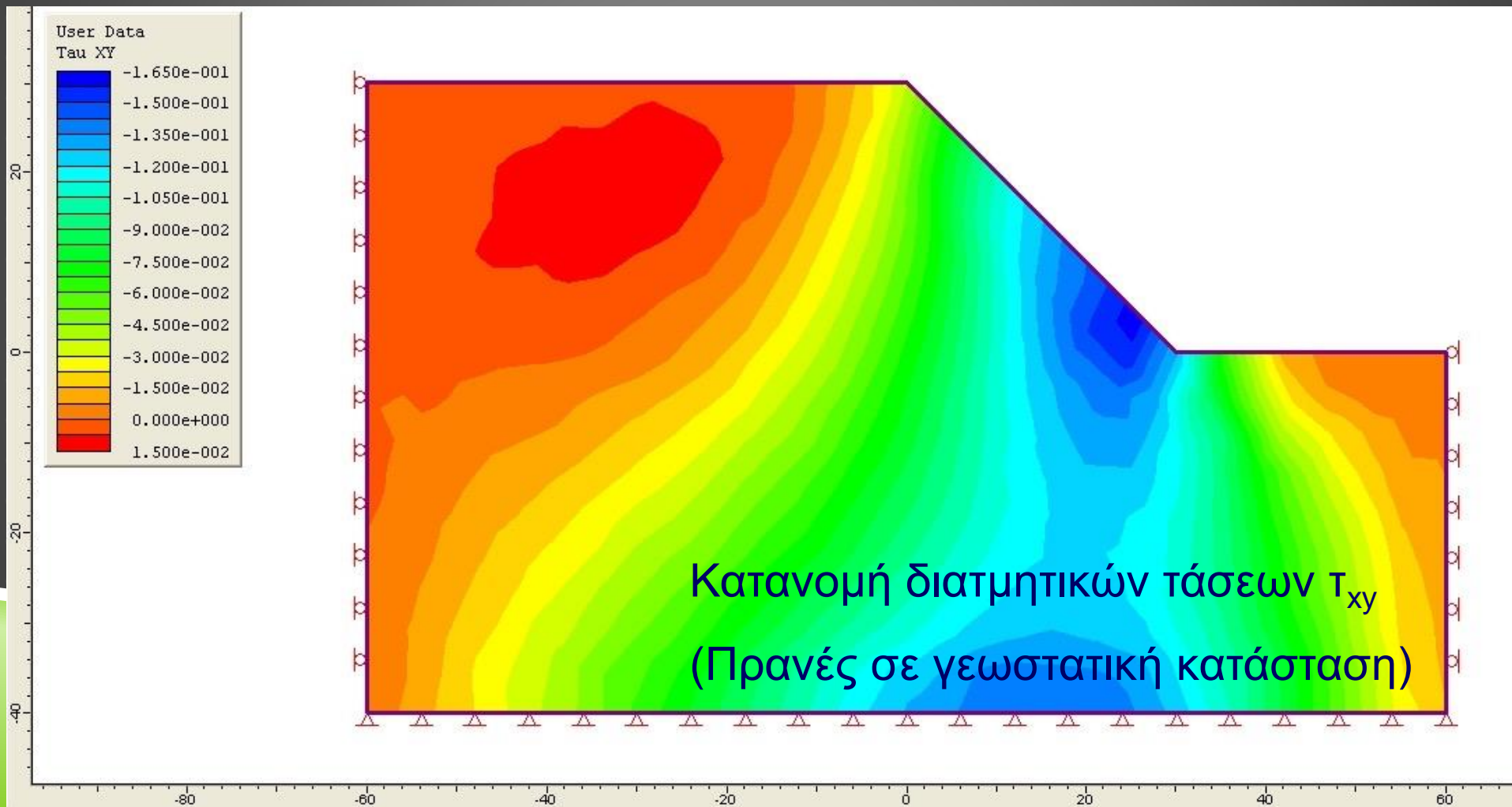
ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΩΝ ΤΑΣΕΩΝ



ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΩΝ ΤΑΣΕΩΝ



ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΩΝ ΤΑΣΕΩΝ



ΣΗΜΑΣΙΑ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

Η ανάπτυξη (ή μεταβολή) διατμητικών τάσεων προκαλεί:

- ▶ Παραμορφώσεις (κυρίως διατμητικές) μέσω του μέτρου διατμήσεως (G) του βράχου
- ▶ Πιθανώς την αστοχία (θραύση ή διαρροή) του υλικού, εάν οι τιμές των διατμητικών τάσεων εξισωθούν με τις τιμές των κριτηρίων αστοχίας.

Στη θραύση το γεωυλικό (βράχος-βραχώμαζα) “αμύνεται” με την αντοχή στη διάτμηση.

Πως μπορεί να αστοχήσει η βραχώμαζα ;

✘ Με ολίσθηση τεμάχους πάνω σε συγκεκριμένες ασυνέχειες.

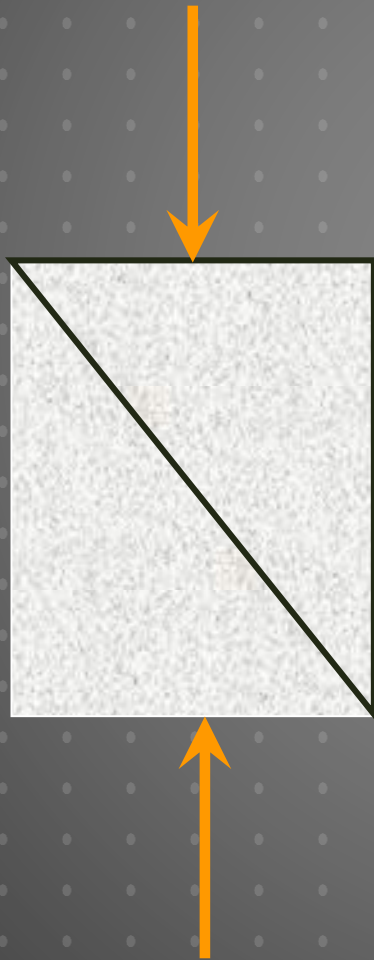
Στην περίπτωση αυτή ενδιαφέρουν οι παράμετροι που περιγράφουν τις ασυνέχειες

(Προσεχώς Στο επόμενο μάθημα)

✘ Ως «οιωνεί» ομοιογενές και ισότροπο υλικό. Κάτι σαν έδαφος.....

Στην περίπτωση αυτή ενδιαφέρουν οι παράμετροι που περιγράφουν τη βραχώμαζα ως σύνολο

Δοκίμιο με μία ασυνέχεια



Άρρηκτος βράχος ή πολύ
κερματισμένη βραχώμαζα



Πως μπορεί να αστοχήσει η βραχόμαζα ?

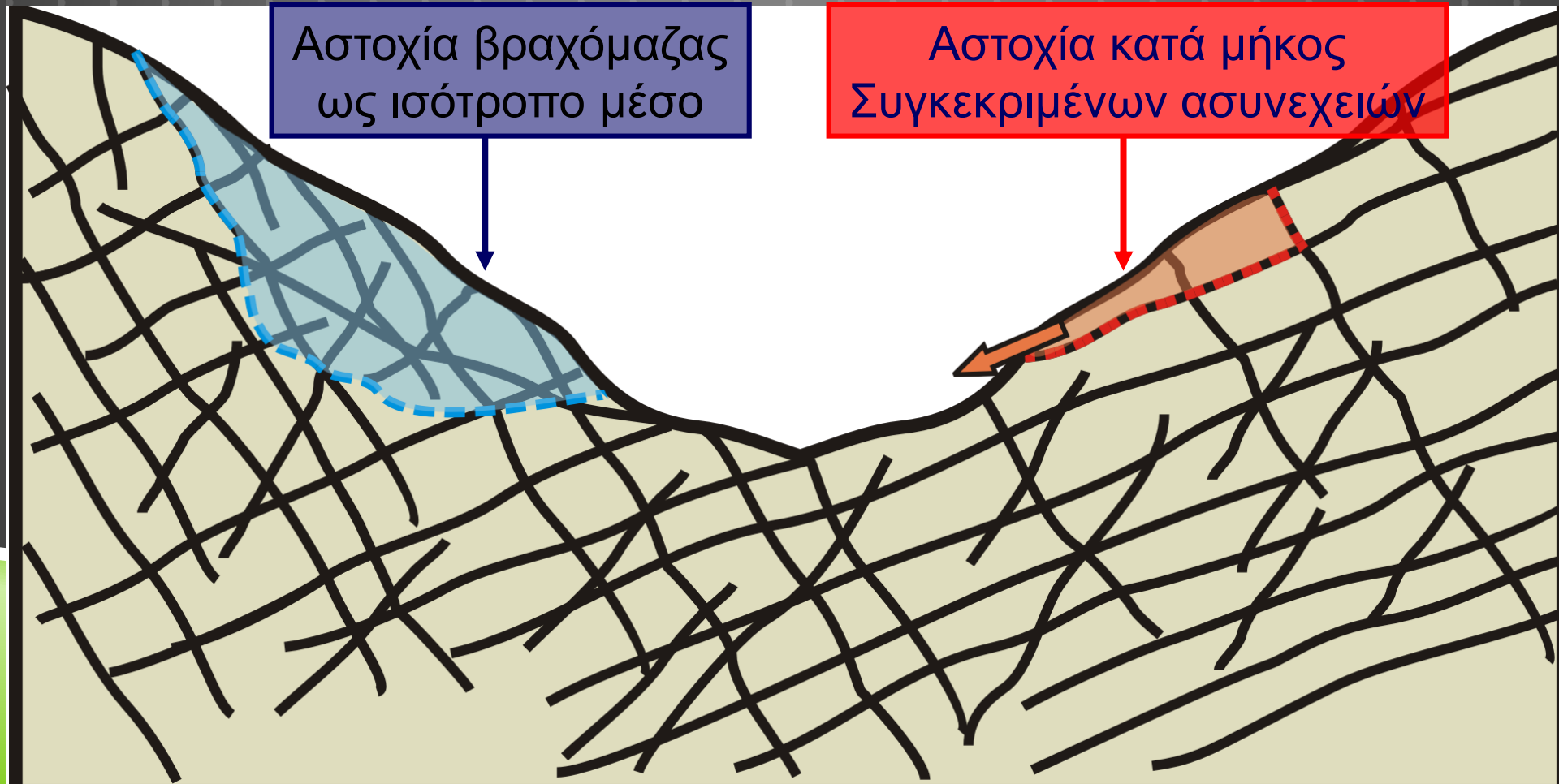
Οι διατμητικές τάσεις μπορεί να προκαλούν:

- ▶ σε άρρηκτο πέτρωμα: φαθυρή θραύση υπό πολύ υψηλές τάσεις (π.χ. σε βαθιές σήραγγες). (Ισότροπη συμπεριφορά)
- ▶ στη βραχόμαζα: θραύση κατά μήκος σύνθετης επιφάνειας που εμπλέκει μια σειρά από διάφορες ασυνέχειες αλλά και διάρρηξη των γεφυρών του άρρηκτου βράχου μεταξύ των ασυνεχειών αυτών. (Ισότροπη συμπεριφορά)
- ▶ στις ασυνέχειες: θραύση κατά μήκος μίας ή δύο συγκεκριμένων ασυνεχειών (επίπεδες, σφηνοειδείς ολισθήσεις). (Ανισότροπη συμπεριφορά)

Πως μπορεί να αστοχήσει η βραχόμαζα ?

Αστοχία βραχόμαζας
ως ισότροπο μέσο

Αστοχία κατά μήκος
συγκεκριμένων ασυνεχειών



Ποιο είναι το υλικό που μελετάμε ?

Βραχόμαζα

- ✗ Άρρηκτο βράχος
- ✗ Ασυνέχειες

Ιδιότητες βραχόμαζας

- ✗ Ανομοιογενής
- ✗ Ανισότροπη

- ▶ Τα τεχνικά έργα σχεδόν κατά κανόνα κατασκευάζονται επί ή εντός κερματισμένου-διαταραγμένου βραχώδους υλικού (βραχόμαζα) και όχι σε άρρηκτο βράχο.
- ▶ Συνεπώς, τελικός στόχος οι ιδιότητες (αντοχή και παραμορφωσιμότητα) της βραχόμαζας.

Είναι πολύ δύσκολο να προσδιοριστούν οι παράμετροι που την περιγράφουν ως ενιαίο, ομοιογενές και ισότροπο υλικό.....

Για κάθε υλικό τι θέλουμε να ξέρουμε?

✘ Πως παραμορφώνεται για δεδομένη ένταση

Δηλαδή σχέσεις τάσεων - παραμορφώσεων

Απαραίτητα δεδομένα E , ν

✘ Πότε αστοχεί

Δηλαδή την αντοχή του σε διάφορες καταπονήσεις

Απαραίτητα δεδομένα οι παράμετροι αντοχής του κριτηρίου αστοχίας που χρησιμοποιείται

Για τη βραχόμαζα πως τα υπολογίζουμε?

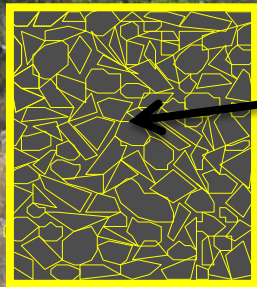
Αρχικά υπολογίζουμε τις παραμέτρους του άρρηκτου βράχου και στη συνέχεια με απομείωση αυτών.....

Απομείωση ?

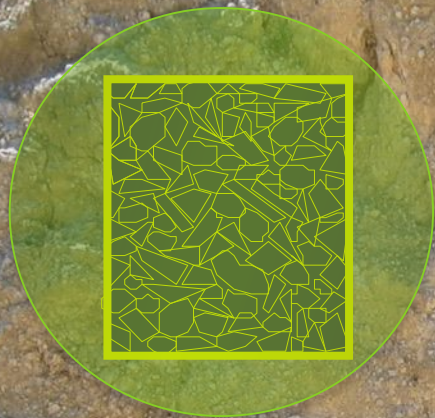
.....καταλήγουμε στις αντίστοιχες παραμέτρους της βραχόμαζας

**Απαιτείται πρώτα η μελέτη του
άρρηκτου βράχου**

Αποδομημένη
βραχόμαζα



Εμείς ξέρουμε
την αντοχή του
άρρηκτου
βράχου (του
τεμάχους μέσα
στη βραχόμαζα)



Θέλουμε να
ξέρουμε την
αντοχή όλης της
βραχόμαζας

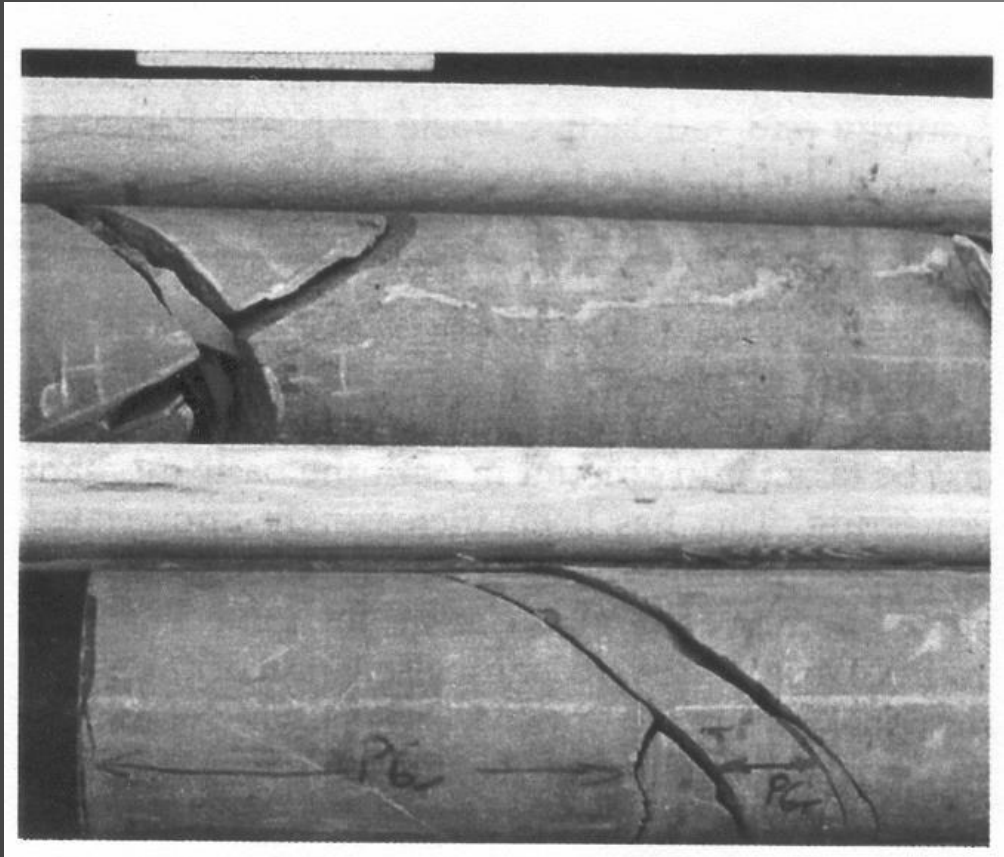


«ΤΕΧΝΙΚΗ ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΒΡΑΧΟΥ-ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ»

2. ΑΝΤΟΧΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΑΡΡΗΚΤΟΥ ΒΡΑΧΟΥ

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΑΝΤΟΧΗΣ
(ΣΥΝΟΧΗ C - ΓΩΝΙΑ ΤΡΙΒΗΣ Φ) ΚΑΙ
ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ E_1

ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΉ ΑΝΤΟΧΉ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΑΡΡΗΚΤΟΥ ΒΡΑΧΟΥ



Για τον άρρηκτο βράχο λοιπόν.....

✘ Πως παραμορφώνεται για δεδομένη ένταση

Δηλαδή σχέσεις τάσεων - παραμορφώσεων

Απαραίτητα δεδομένα E, ν

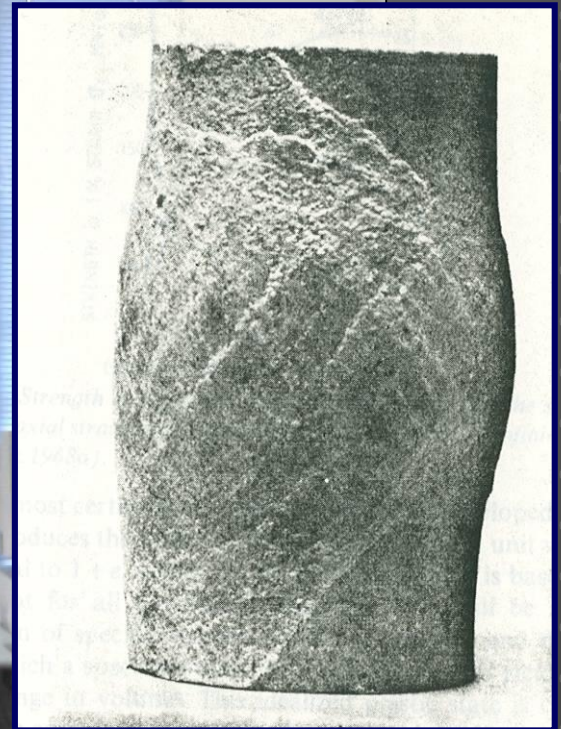
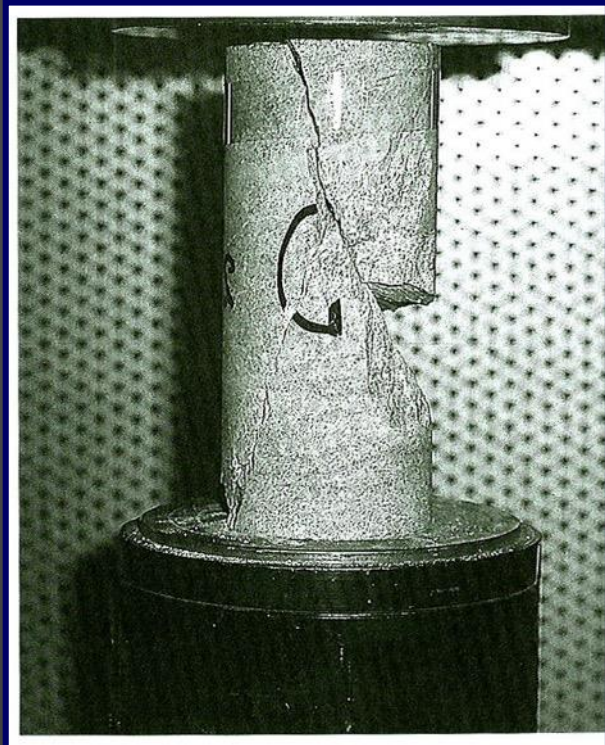
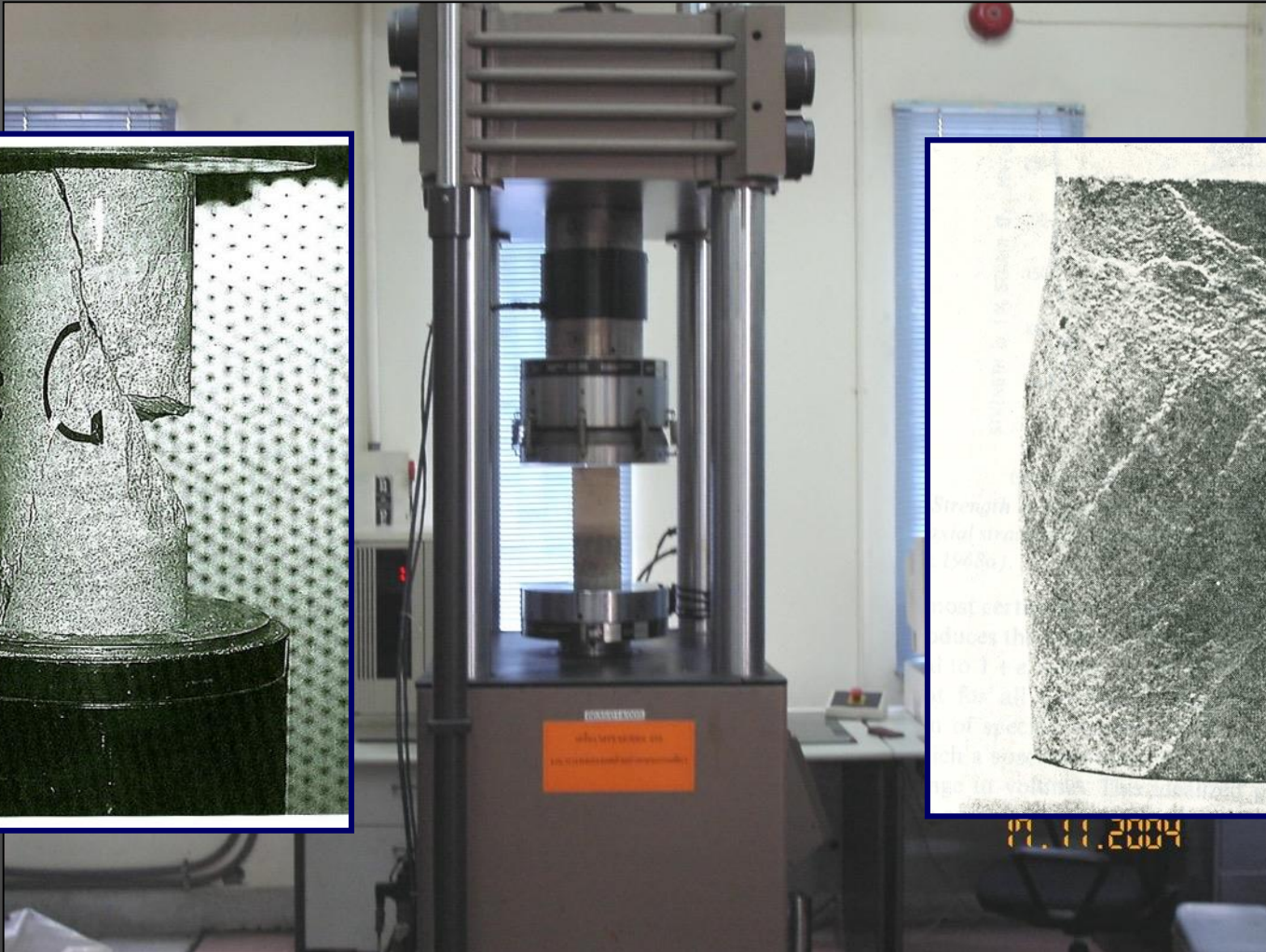
Αστοχία και παραμόρφωση άρρηκτου βράχου

Εργαστηριακές δοκιμές στο βράχο

- ▶ Μονοαξονικής φόρτισης
- ▶ Τριαξονικής φόρτισης
- ▶ Σημειακής φόρτισης (Point Load test)
- ▶ Άμεσης διάτμησης

Αστοχία και παραμόρφωση άρρηκτου βράχου

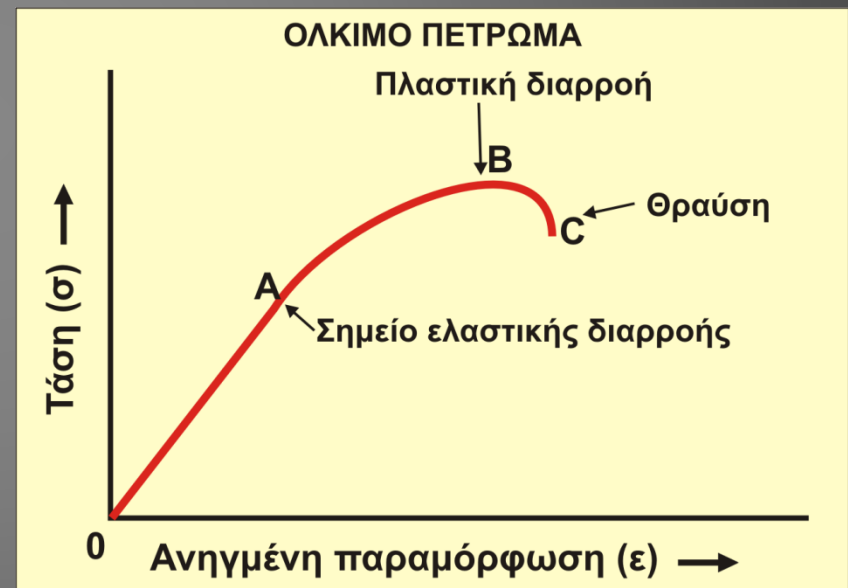
Μονοαξονική φόρτιση



Θραύση του άρρηκτου βράχου

Μονοαξονική θλιπτική αντοχή \Rightarrow αναφέρεται στο μέγιστο επίπεδο τάσεων που μπορεί να φέρει ένα δείγμα βράχου

Η μηχανική συμπεριφορά υπό απλή θλίψη περιγράφεται από την καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης:



Όταν το πέτρωμα φορτιζόμενο θραύεται (αστοχεί) απότομα σε παραμόρφωση μικρότερη του 1% χαρακτηρίζεται ως πολύ ψαθυρό.

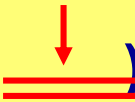
Πέτρωμα	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (MPa)
Ασβεστόλιθος	4-250
Ψαμμίτης	6-170
Μαργόλιθος	10-70
Αργ. σχιστόλιθος	8-20
Ιλυόλιθος	10-70
Γύψος	4-40
Γνεύσιος	80-250
Μάρμαρο	50-200
Σχιστόλιθος	20-100
Χαλαζίτης	90-300
Βασάλτης	80-400
Γρανίτης	120-290
Ανδεσίτης	70-200
Ρυόλιθος	150-260
Τόφος	1-40

Παραμορφωσιμότητα άρρηκτου βράχου

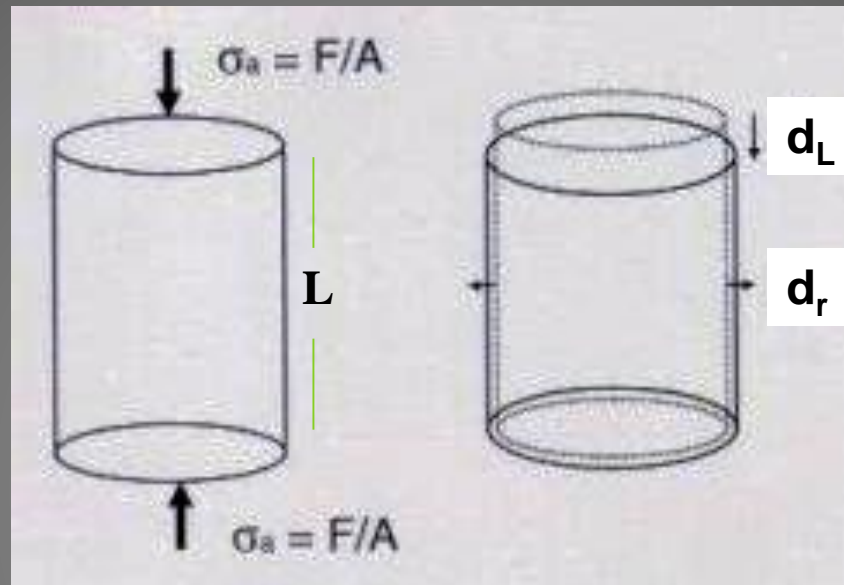
Το πέτρωμα ως ελαστικό μέσο
(Ορισμός ελαστικού μέσου $E = \sigma/\epsilon$)

Μέτρο Παραμορφωσιμότητας E

Πετρώματα \Rightarrow Μη γραμμική ελαστικότητα

- E μεταβάλλεται με σ
- E μεταβάλλεται με φορά φορτίου (E_{\max} )
- E συνάρτηση της δομής («αλληλοκλειδώματος κόκκων»)
- $E_{\text{ξηρό}} \neq E_{\text{υγρό}}$
- E μεγαλύτερο αν υπήρξε μεγάλη σε διάρκεια φόρτιση στο παρελθόν

Παραμορφωσιμότητα άρρηκτου βράχου



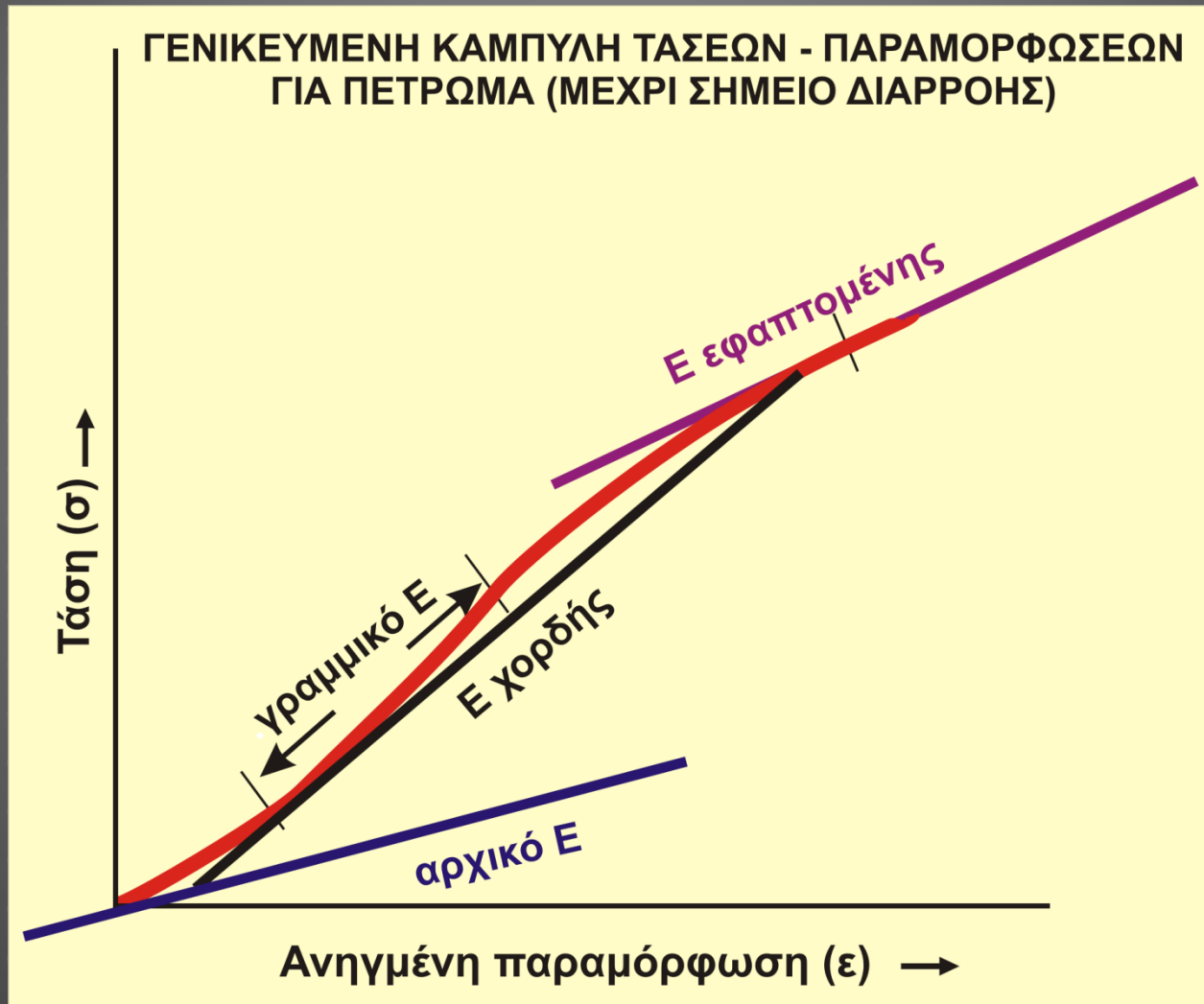
Με την επιβολή αξονικής τάσης, $\sigma_a = F/A$ (δύναμη/διατομή), στο δοκίμιο του πετρώματος παρατηρείται:

- μείωση του μήκους του L , κατά d_L
- αύξηση της ακτίνας r , κατά d_r

Αξονική παραμόρφωση $\longrightarrow \epsilon_a = d_L / L$

Διαμετρική παραμόρφωση: $\longrightarrow \epsilon_d = d_r / r$

Παραμορφωσιμότητα άρρηκτου βράχου



Ψαθυρότητα

Πολύ ψαθυρό (very brittle)

Ψαθυρό (brittle)

Ημι-ψαθυρό-Μεταβατικό (semi brittle)

Ύλκιμο (ductile)

Παραμόρφωση, ϵ

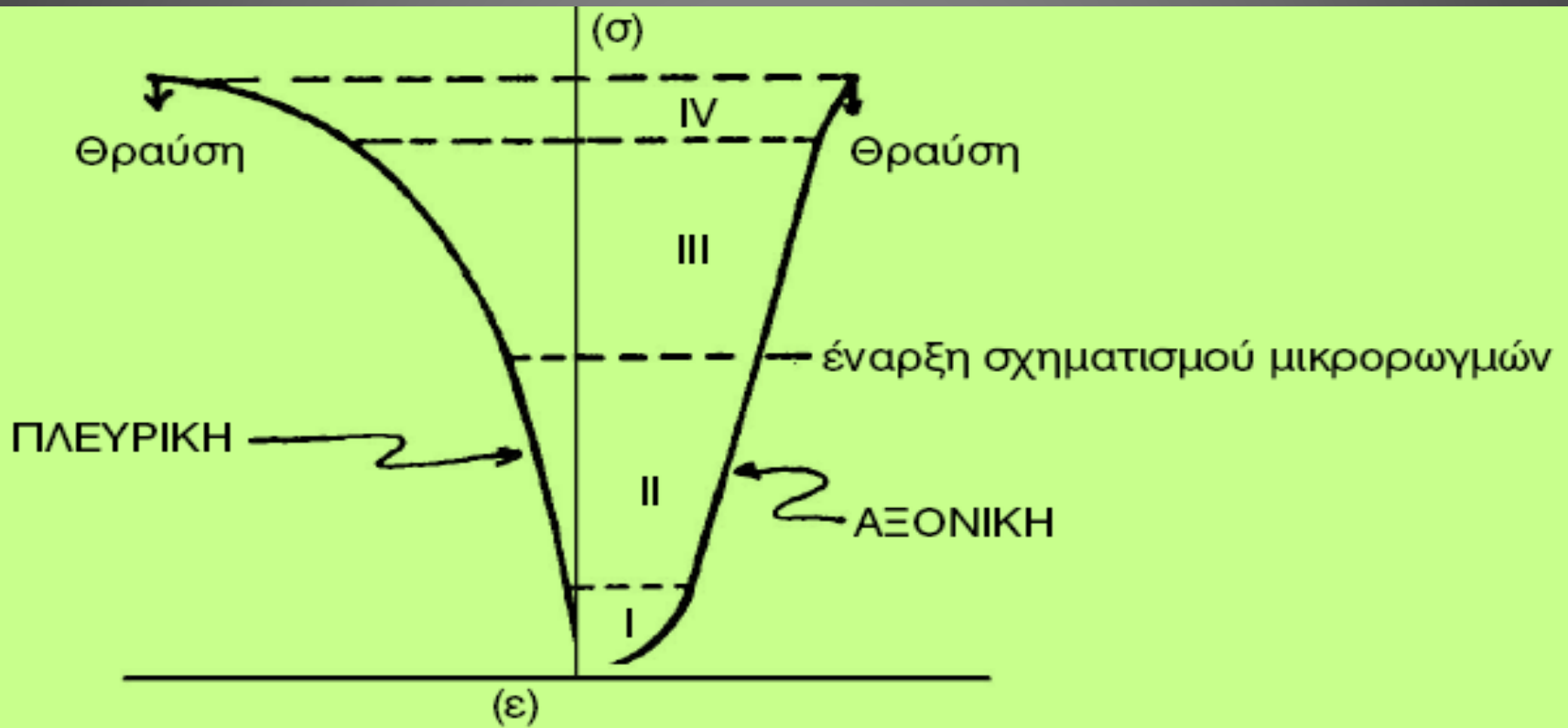
< 1%

1 – 3 %

3 – 5 %

> 5%

Heard, 1966



Τυπική καμπύλη τάσεων - παραμορφώσεων

Σταθερά παραμορφωσιμότητας – Modulus Ratio (MR)

$$E_i = MR \cdot \sigma_{ci}$$

	Class	Group	Texture			
			Coarse	Medium	Fine	Very fine
SEDIMENTARY	Clastic		Conglomerates 300-400	Sandstones 200-350	Siltstones 350-400	Claystones 200-300
			Breccias 230-350		Greywackes 350	Shales 150-250 *
						Marls 150-200
	Non-Clastic	Carbonates	Crystalline Limestone 400-600	Sparitic Limestones 600-800	Micritic Limestones 800-1000	Dolomites 350-500
Evaporites			Gypsum (350)**	Anhydrite (350)**		
Organic					Chalk 1000+	
METAMORPHIC	Non Foliated		Marble 700-1000	Hornfels 400-700	Quartzites 300-450	
	Slightly foliated		Migmatite 350-400	Amphibolites 400-500	Gneiss 300-750*	
	Foliated*			Schists 250-1100*	Phyllites /Mica Schist 300-800*	Slates 400-600*

IGNEOUS	Plutonic	Light	Granite+ 300-550	Diorite+ 300-350		
		Dark	Gabbro 400-500	Dolerite 300-400	Granodiorite+ 400-450	
	Hypabyssal		Porphyries (400)**		Diabase 300-350	Peridotite 250-300
	Volcanic	Lava		Rhyolite 300-500	Dacite 350-450	
Pyroclastic		Agglomerate 400-600	Andesite 300-500	Volcanic breccia (500)**	Basalt 250-450	Tuff 200-400

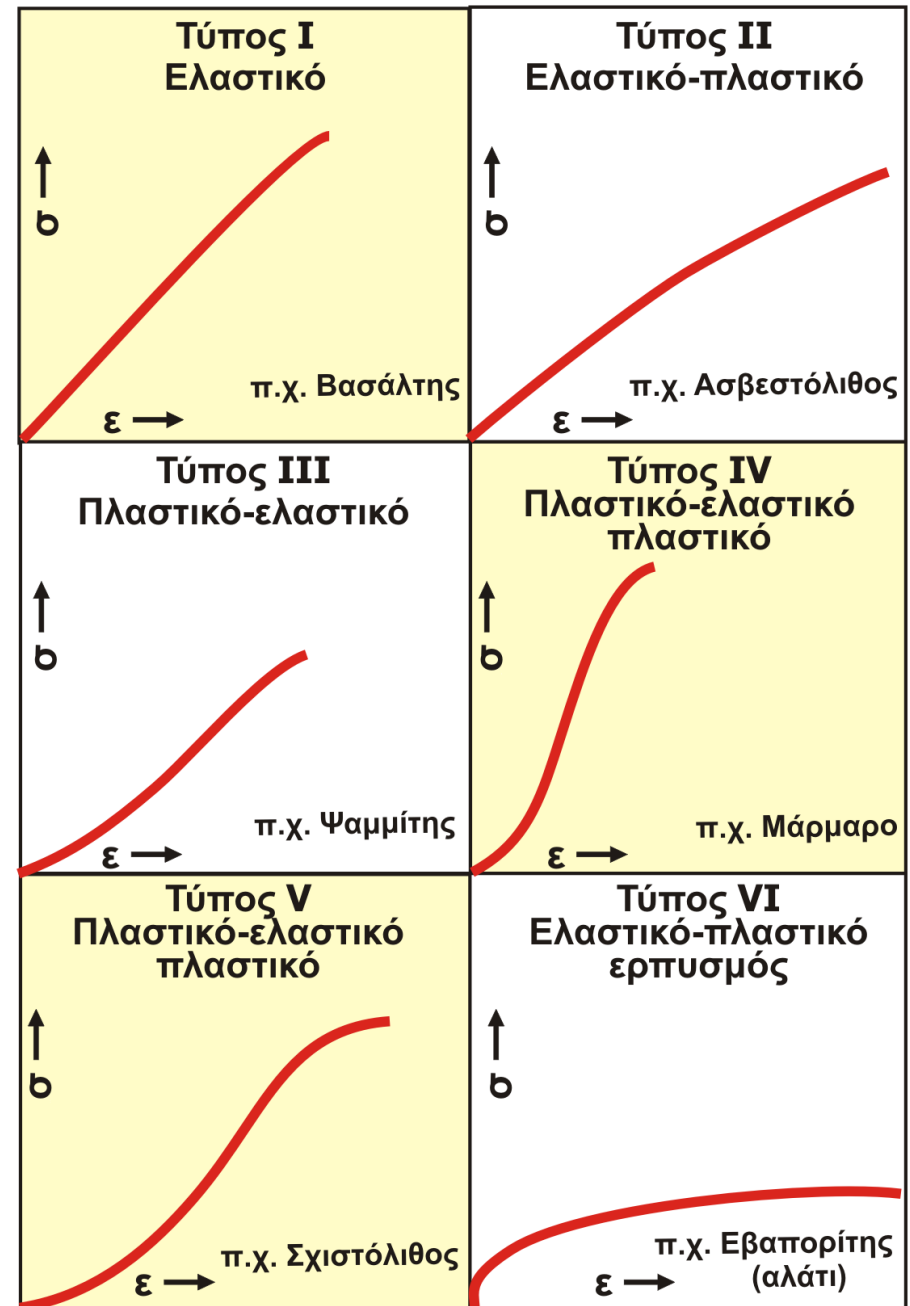
Χαρακτηριστικές συμπεριφορές

Προσέγγιση ελαστικής συμπεριφοράς

όταν:

- σκληρά (π.χ. με πυριτικά ορυκτά)
- πυκνής δομής
- ελάχιστου πορώδους

Τυπικές καμπύλες σ - ϵ για πετρώματα σε μοναξονική θλίψη (κατά Hendron, 1968)

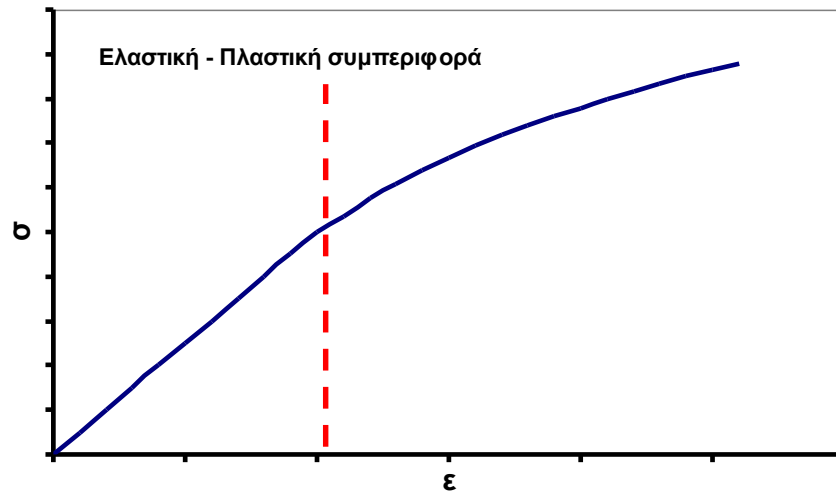


Χαρακτηριστικές συμπεριφορές

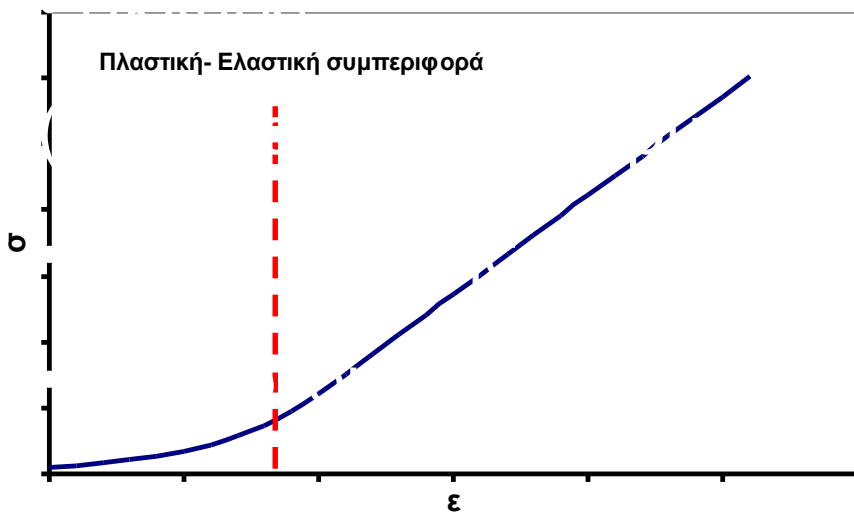
$\sigma - \epsilon$



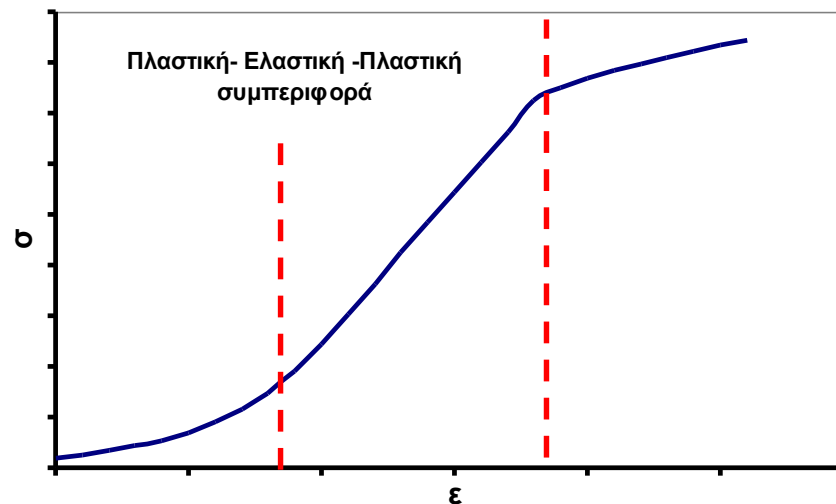
$\sigma - \epsilon$



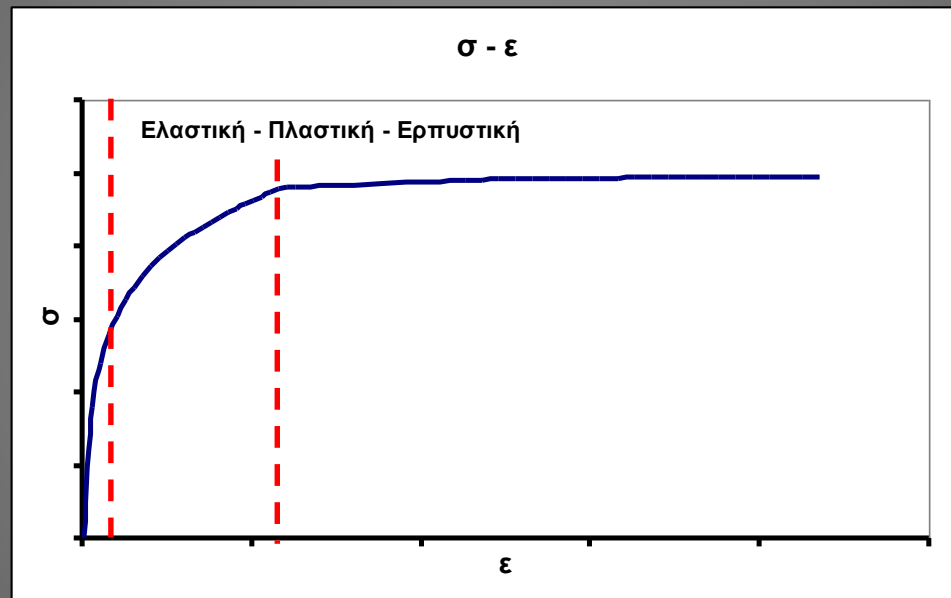
$\sigma - \epsilon$



$\sigma - \epsilon$



Χαρακτηριστικές συμπεριφορές

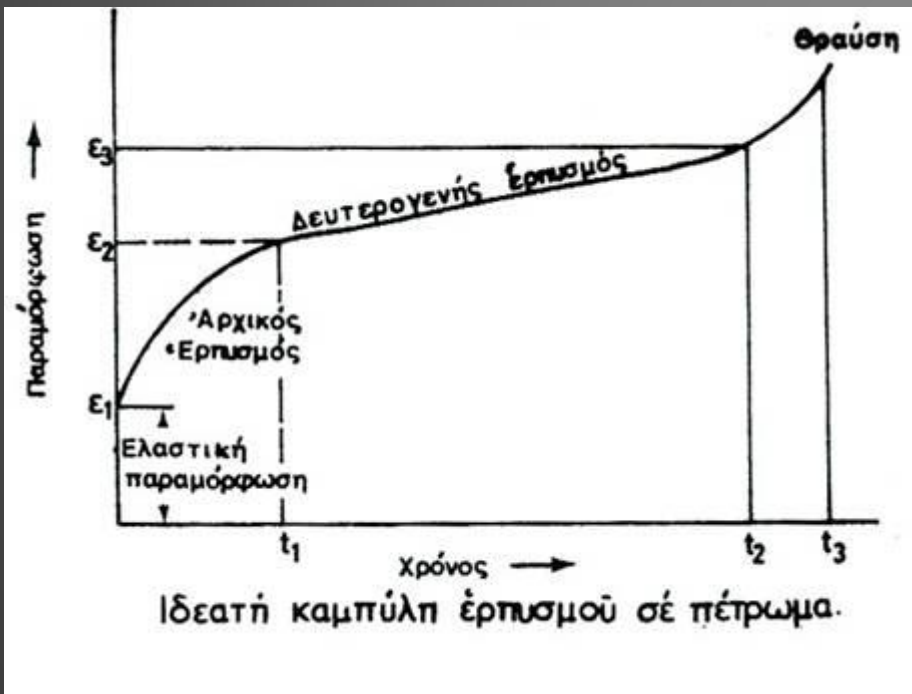


ΕΡΠΥΣΜΟΣ

Παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου, κάτω από το ίδιο περιβάλλον τάσεων

Επιπλέον: επίδραση θερμοκρασίας, πίεσης πόρων.

Ιδεατή καμπύλη



Πρώτος ερπυσμός:

επαναφορά παραμόρφωσης

Δεύτερος ερπυσμός:

καμπύλη με αυξανόμενη κλίση \rightarrow
παραμόρφωση μόνιμη

Τρίτος ερπυσμός:

επιτάχυνση \rightarrow θραύση

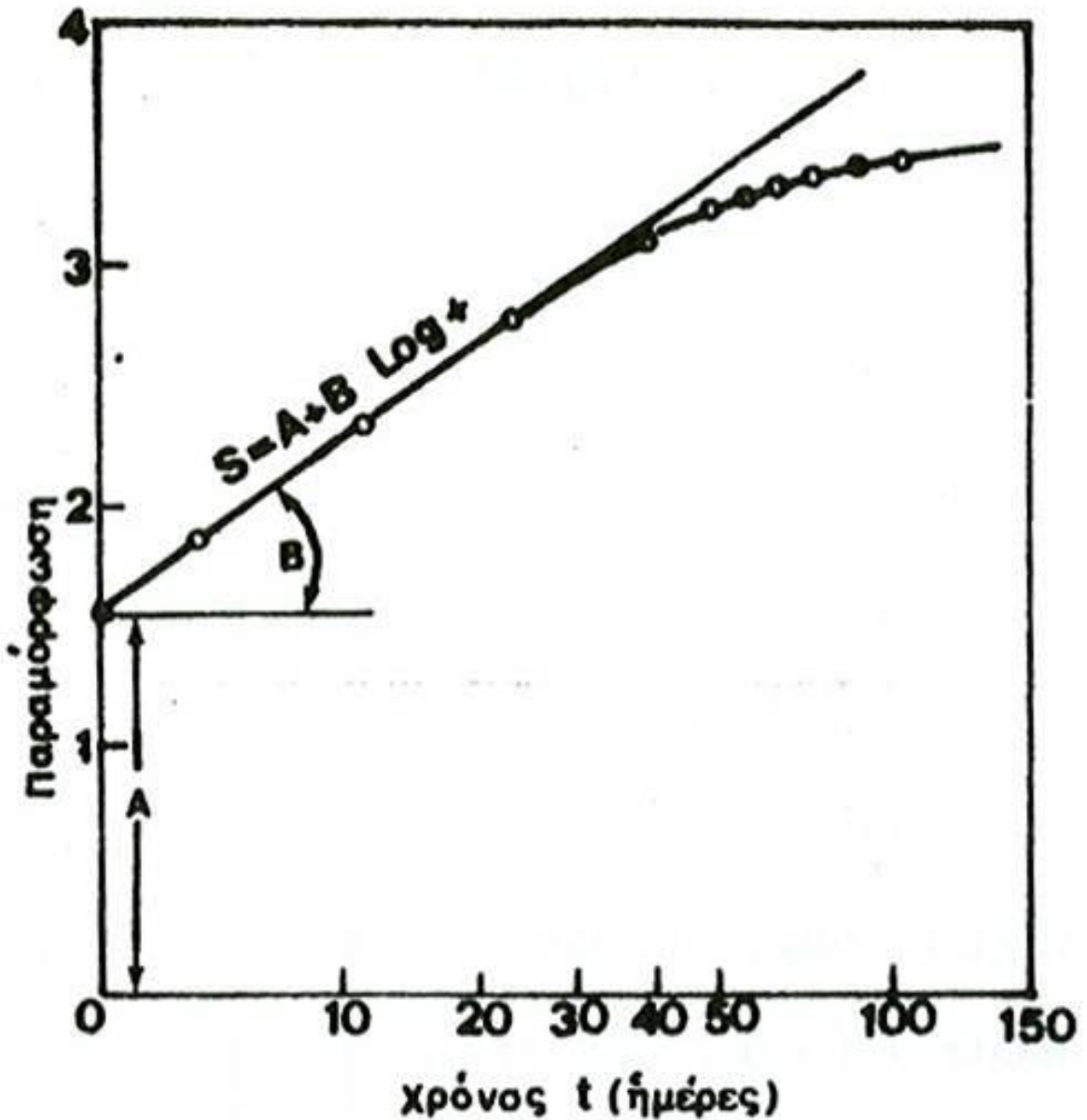
Προσδιορισμός σταθεράς
έρπουσμού

$$\varepsilon_t = A + B \log t + C_t$$

A=ελαστική παραμόρφωση,

B=πρώτος έρπουσμός,

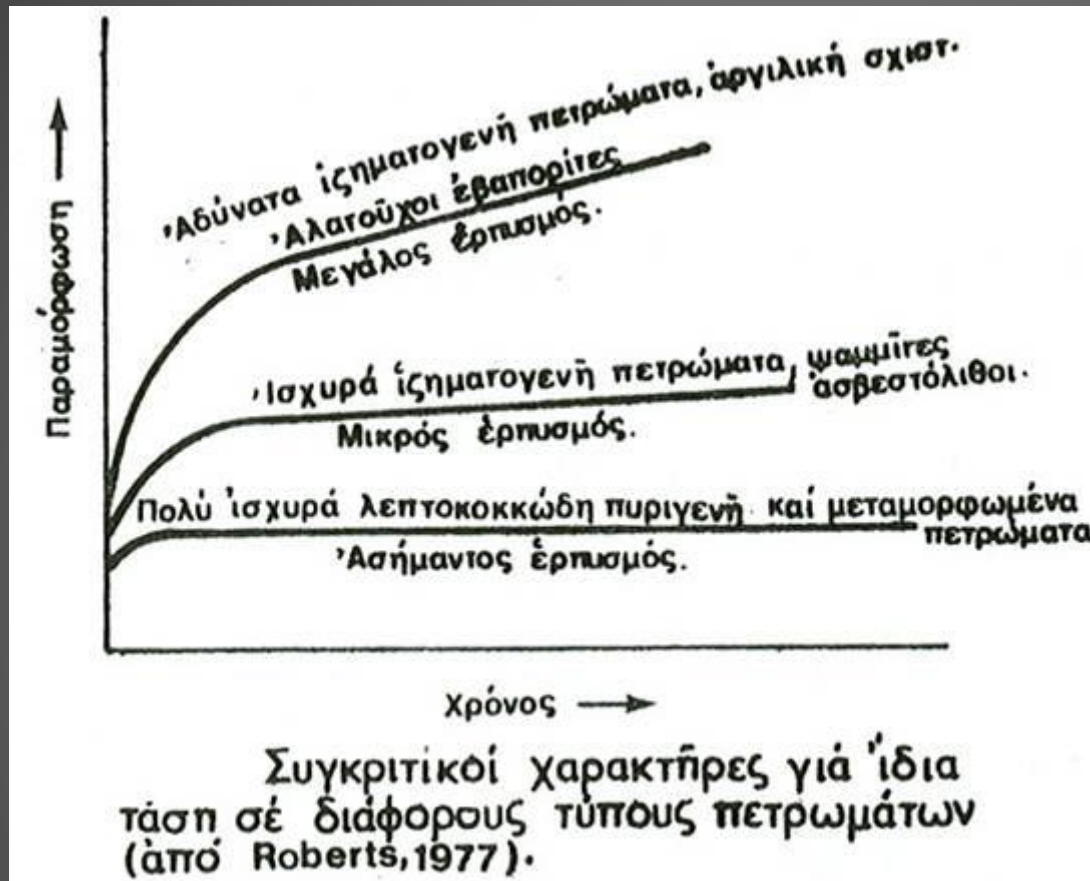
C_t=δεύτερος έρπουσμός



Προσδιορισμός της σταθεράς έρπουσμού.

Διαφάνεια από Γ. Τσιαμπάο

Έρπυσμός στους διαφόρους τύπους πετρωμάτων



Διαφάνεια από Γ. Τσιαμπάο

Τεχνική σημασία: υπερβολικές παραμορφώσεις σε ορισμένα πετρώματα

Τεχνικά έργα: βαθιές σήραγγες, βαθιά φρέατα

Διατμητική αντοχή του άρρηκτου βράχου

□ Πότε αστοχεί

Δηλαδή η διατμητική αντοχή του σε διάφορες καταπονήσεις

Απαραίτητα δεδομένα οι παράμετροι διατμητικής αντοχής του κριτηρίου αστοχίας που χρησιμοποιείται

ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ, σ_1 , σ_3



Δοκιμή τριαξονικής φόρτισης, με επιβολή σ_1 , σ_3 για βραχώδη δοκίμια



Τριαξονικό κελί Hoek

ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ, σ_1 , σ_3

- ▶ Ομοιόμορφα πλευρικά εξασκούμενη πίεση (σ_3) - πλευρικές τάσεις (σ_2 και σ_3 : ίσες)
- ▶ Εργαστηριακή προσομοίωση επιτόπου συνθηκών με την εκτέλεση κλασσικών **τριαξονικών δοκιμών** στο αέριο πέτρωμα
- ▶ Δοκιμές φόρτισης σε 3-5 κυλινδρικά δοκίμια του πετρώματος υπό διαφορετικές πλευρικές πιέσεις σ_3 μέχρι τη θραύση τους

Αυξανόμενης της πλευρικής πίεσης (σ_3) αυξάνεται και η μηχανική αντοχή του βραχώδους υλικού (τάση θραύσης σ_1)

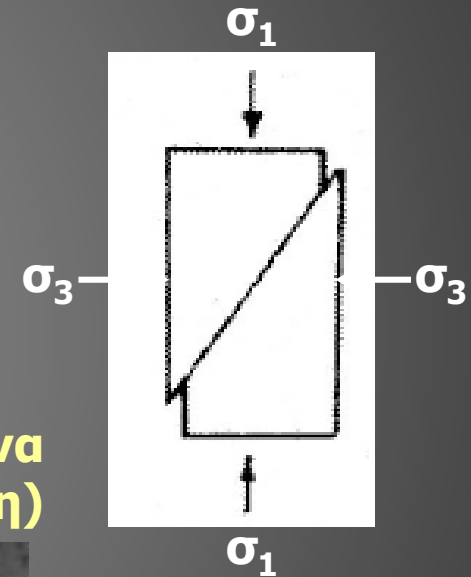
ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ, σ_1 , σ_3

Βραχώδες υλικό: **όλκιμο (παραμόρφωση >5%) - **ψαθυρό** (παραμόρφωση <3%)**

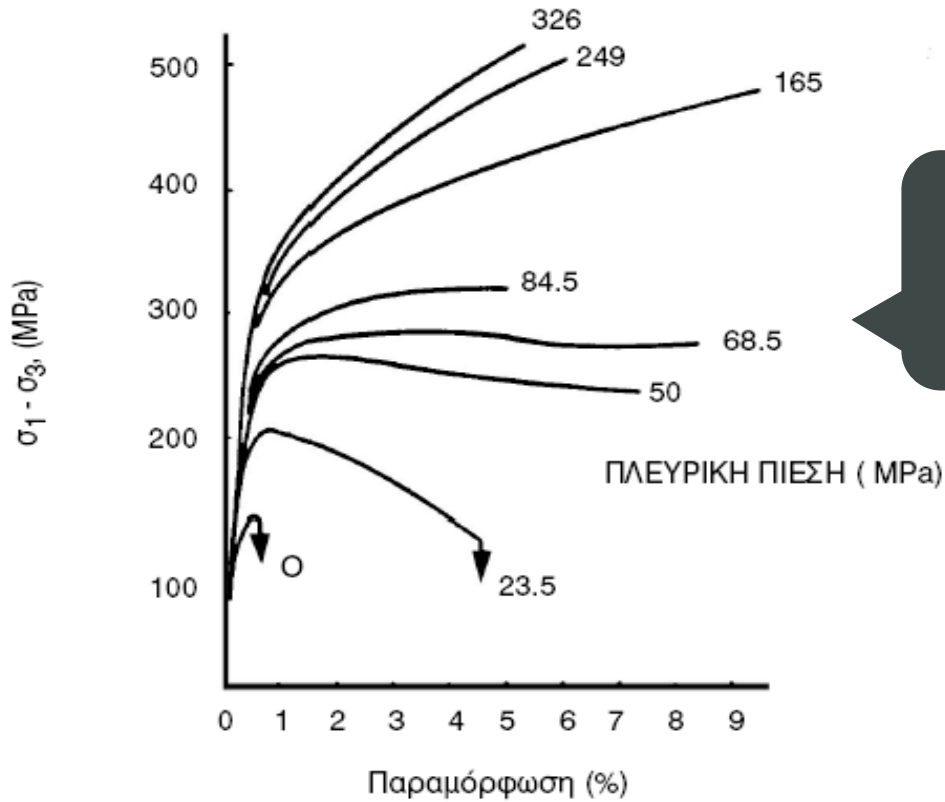
Ψαθυρά πετρώματα

Θραύση δοκιμίου με διάτμηση (shear fracture) κατά μήκος ενός επιπέδου κεκλιμένου ως προς τον άξονα της μέγιστης κύριας τάσης, με γωνία μικρότερη των 45° (συνήθως 20° - 30°) και σχετική μετακίνηση πάνω στο επίπεδο αυτό

Σε μερικές περιπτώσεις παρατηρούνται δύο τεμνόμενα διατμητικά επίπεδα θραύσης (συζυγής διατμητική θραύση) ή ακόμα πολλαπλή διατμητική θραύση)



Αντοχή – παραμορφωσιμότητα σε τριαξονική θλίψη



Μετατροπή από ψαθυρή σε
όλκιμη κατάσταση
 $\sigma_3 \approx \sigma_1/3$
κράτυνση

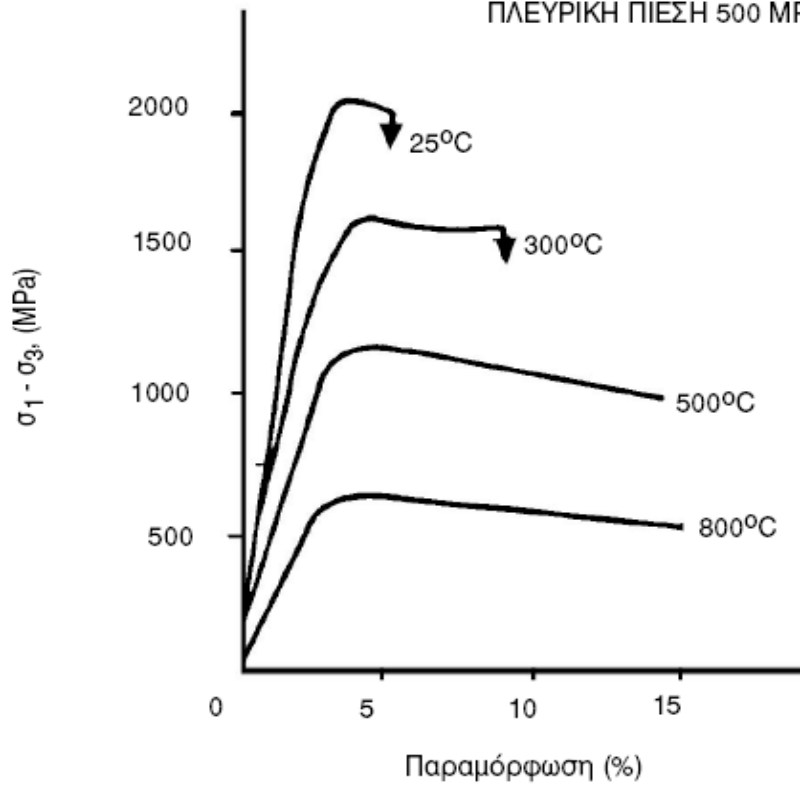
Πλευρική πίεση
 $\sigma_2 = \sigma_3$

21,28,35,42 MPa

0,7,14 MPa



ΠΛΕΥΡΙΚΗ ΠΙΕΣΗ 500 MPa



Θερμοκρασία



Αντοχή



Ταχύτητα παραμόρφωσης (strain rate)



Αντοχή



Κριτήρια θραύσης

Υπάρχει πάντοτε ένας κρίσιμος συνδυασμός των κύριων τάσεων (σ_1 και σ_3) που επιβάλλονται στο βραχώδες υλικό (άρρηκτο πέτρωμα) ο οποίος μπορεί να προκαλέσει τη θραύση (αστοχία) του.

Ο συνδυασμός αυτός αποτελεί στην ουσία και το κριτήριο θραύσης

Γενικά, **κριτήριο θραύσης** (criterion of failure) είναι μια αλγεβρική έκφραση των μηχανικών συνθηκών κάτω από τις οποίες ένα υλικό αστοχεί από θραύση ή παραμορφώνεται μέχρι κάποια σαφώς καθορισμένα όρια.

Το όριο θραύσης εξαρτάται από τις κύριες τάσεις που δρουν πάνω στο δοκίμιο του πετρώματος και από τον τύπο της θραύσης.

$$\sigma_1 = f(\sigma_3)$$

Επιλογή έκφρασης κριτηρίου θραύσης

- A. Κριτήριο θραύσης που εκφράζει την αντοχή σε διάτμηση με όρους ενεργών ορθών τάσεων που επενεργούν σε συγκεκριμένο επίπεδο ή ζώνη αδυναμίας.
- B. Κριτήριο θραύσης με τριαξονικά δεδομένα σε όρους μέγιστης κύριας τάσης κατά την θραύση, έναντι ελάχιστης κύριας τάσης .

Το **κριτήριο A** συνήθως σε περιπτώσεις αναλύσεων οριακής ισορροπίας π.χ. Ολίσθησης βράχου.

Το **κριτήριο B** σε αναλύσεις ευστάθειας υπόγειων έργων σε περιβάλλον μέσων ή υψηλών επιπέδων τάσεων, όπου η απόκριση των στοιχείων του βράχου στις κύριες τάσεις που του ασκούνται είναι πρώτιστης σημασίας

Διατμητική αντοχή του άρρηκτου βράχο

Κριτήρια θραύσης

Mohr – Coulomb: Κριτήριο θραύσης που εκφράζει την αντοχή σε διάτμηση με όρους ενεργών ορθών τάσεων που επενεργούν σε συγκεκριμένο επίπεδο ή ζώνη αδυναμίας.

Hoek and Brown: Κριτήριο θραύσης με τριαξονικά δεδομένα σε όρους μέγιστης κύριας τάσης κατά την θραύση, έναντι ελάχιστης κύριας τάσης .

ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΉ ΑΝΤΟΧΉ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΙΣ ΙΔΙΌΤΗΤΕΣ ΜΟΗΡ - COULOMB

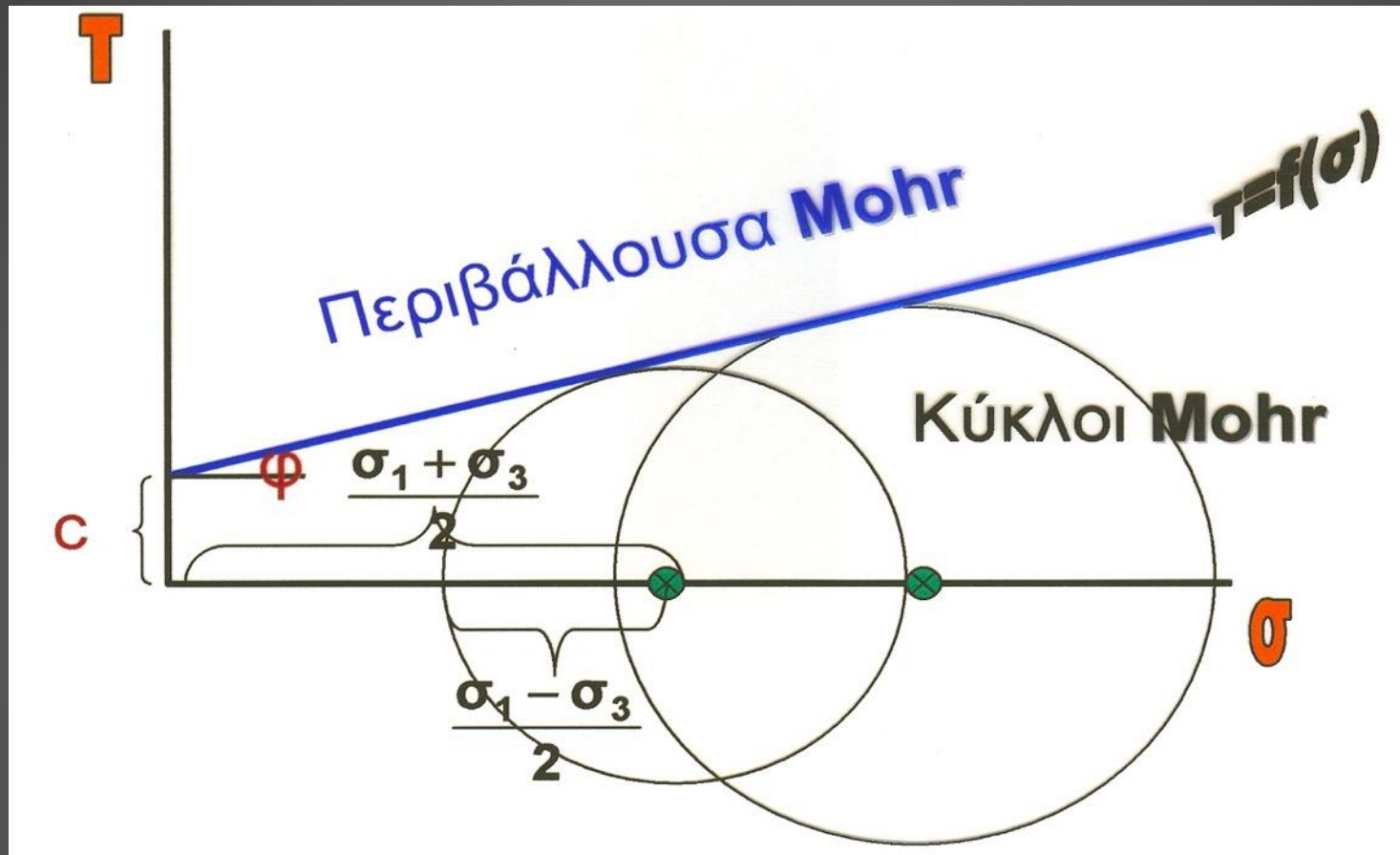
Διατμητική αντοχή: Η τάση που πρέπει να εφαρμοστεί ώστε να προκληθεί η αμοιβαία μετατόπιση των κόκκων ή τεμαχών βράχου.

Εκφράζεται από:

- ▶ Συνοχή c (KPa): Εκφράζει το "δέσιμο" των κόκκων (στον άρρηκτο) ή τεμαχών (στη βραχώμαζα)
- ▶ Γωνία εσωτερικής τριβής φ ($^{\circ}$): Τριβή ανάμεσα στα ορυκτά ή στα τεμάχια που αντιστέκεται στη διάτμηση

**Παρουσία νερού: $c \downarrow$, $\varphi \downarrow$, εμφάνιση u
(μείωση ενεργής τάσης, σ')**

Κριτήριο θραύσης Mohr – Coulomb



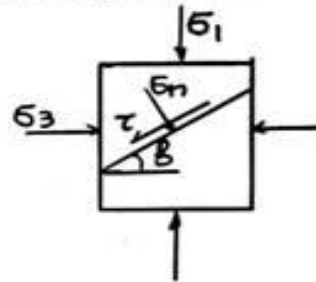
$$\tau = c + \sigma_n \epsilon\varphi\varphi$$

Κριτήριο Mohr - Coulomb

- τ : διατμητική αντοχή (peak shear strength)
- c : "συνοχή" του πετρώματος (cohesion, σταθερά του πετρώματος)
- σ_n : ορθή- κάθετη στην επιφάνεια θραύσης- τάση (normal stress)
- φ : "γωνία εσωτερικής τριβής" του πετρώματος (angle of internal friction)

Κριτήριο Mohr-Coulomb

Το κριτήριο εκφράζει τη σχέση μεταξύ της διατμητικής (τ) και της ορθής τάσης (σ_n) κατά τη θραύση του πετρώματος που λαμβάνει χώρα κατά μήκος μιας επίπεδης επιφάνειας, υπό την επίδραση των κυρίων τάσεων σ_1 (αξονικής) και σ_3 (πλευρικής)



$$\tau = 1/2 (\sigma_1 - \sigma_3) \eta\mu 2\beta$$

$$\sigma_n = 1/2 (\sigma_1 + \sigma_3) + 1/2 (\sigma_1 - \sigma_3) \sigma\upsilon\nu 2\beta$$

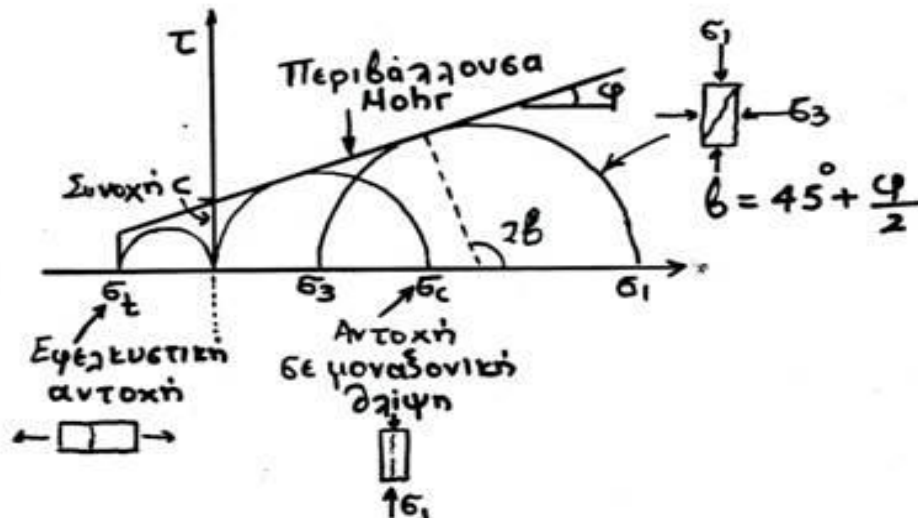
$$\tau = c + \sigma_n \epsilon\phi$$

όπου:

c : συνοχή (η διατμητική αντοχή για $\sigma_n = 0$)

ϕ : γωνία εσωτερικής τριβής

Αν υπάρχει νερό: $\tau = c + (\sigma_n - u) \epsilon\phi$, u = πίεση νερού πόρων



Κριτήριο αστοχίας Hoek – Brown για τον άρρηκτο βράχο

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1 \right)^{0.5}$$

σ_{ci} Αντοχή του άρρηκτου βράχου σε μονοαξονική θλίψη

m_i Σταθερά του υλικού

Hoek and Brown, 2002

ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΗΟΕΚ-BROWN ΓΙΑ ΑΡΡΗΚΤΟ ΒΡΑΧΟ

Συνετάγη ώστε να ικανοποιεί τα εξής:

1. Συμφωνία με τις αντοχές δοκιμών εργαστηρίου (δείγματα 50mm διαμέτρου με προσανατολισμό κάθετο στις ασυνέχειες)
2. Απλότητα (απλή εξίσωση βασιζόμενη όσο το δυνατόν σε αδιάστατους παραμέτρους)
3. Δυνατότητα να μπορεί να «χειρισθεί» κατάλληλα προσαρμοζόμενο και την θραύση ρωγματωμένων βράχων

Κριτήριο εμπειρικό χωρίς αυστηρά θεμελιώδη σχέση μεταξύ των σταθερών της εξίσωσης και των φυσικών χαρακτήρων πετρώματος.

Το κριτήριο εξήχθει βασιζόμενο σε δοκιμές ψαθυρής θραύσης πετρωμάτων. Όχι καλή εφαρμογή όταν το πέτρωμα γίνεται πλάστιμο σε χαμηλά επίπεδα τάσεων.

Όχι καλή εφαρμογή σε σχιστώδη ή ζωνώδη πετρώματα (σχιστόλιθοι, γνεύσιοι)

Κριτήριο αστοχίας Hoek – Brown για τον άρρηκτο βράχο

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1 \right)^{0.5}$$

Hoek and Brown, 2002

σ_1, σ_3 η μέγιστη και ελάχιστη ενεργή τάση αντίστοιχα κατά τη θραύση

σ_{ci} Αντοχή του άρρηκτου βράχου σε μονοαξονική θλίψη

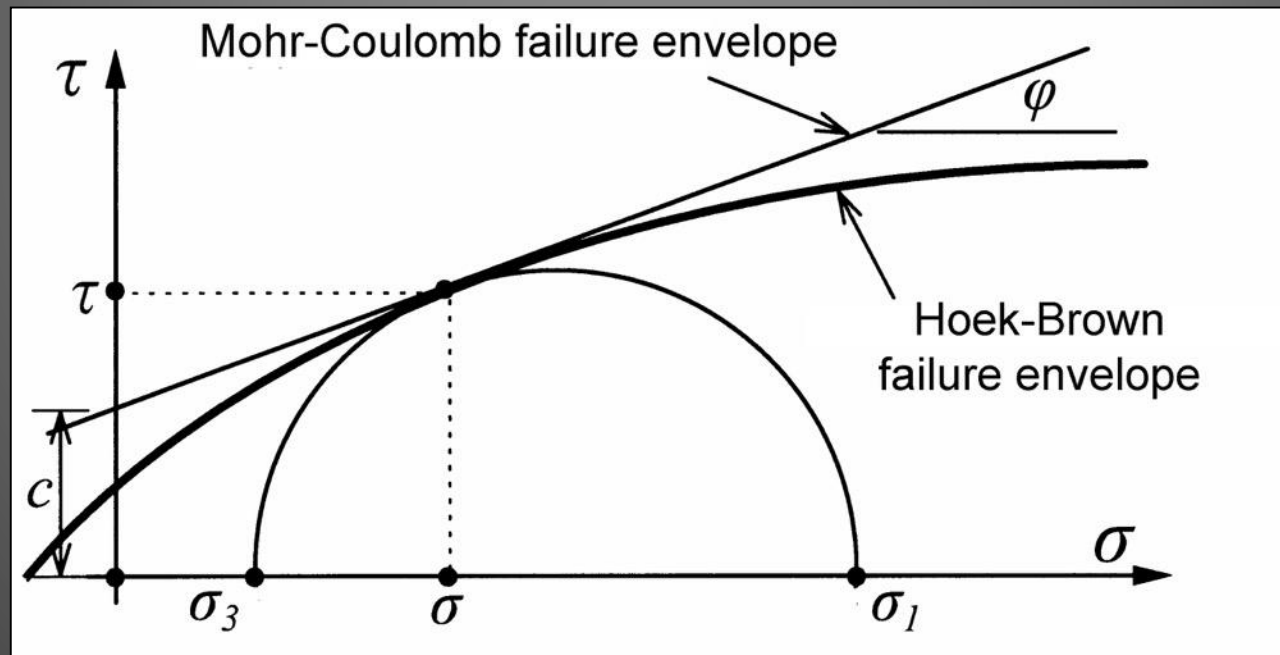
m_i Σταθερά του υλικού

Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, σ_{ci} και η παράμετρος m_i προσδιορίζονται στατιστικώς από μια σειρά τριαξονικών δοκιμών τουλάχιστον σε πέντε εργαστηριακά δοκίμια του πετρώματος, για ισοκατανεμημένες τιμές της σ_3 στο διάστημα

$$0 < \sigma_3' < 0.5 \sigma_{ci}$$

Κριτήριο αστοχίας Hoek – Brown για τον άρρηκτο βράχο

Υπολογισμός παραμέτρων διατμητικής αντοχής (c και φ) του άρρηκτου βράχου μέσω ταύτισης των δύο καμπύλων θραύσης Hoek – Brown και Mohr – Coulomb για συγκεκριμένη σ_3



Η ευθεία - περιβάλλουσα θραύσης (Mohr-Coulomb) ταυτίζεται σε κάποιο σημείο (ανάλογα με την σ_3) με την καμπύλη (Hoek & Brown). Εκεί υπολογίζεται το c και φ .

Θραύση του άρρηκτου βράχου

Τιμές ανεμπόδιστης θλίψης σ_{ci} (UCS)

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	σ_c (MPa)	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ
Πολύ υψηλή αντοχή	>200	Χαλαζίτης, δολερίτης, γάββρος, βασάλτης
Υψηλή αντοχή	100-200	Μάρμαρο, γρανίτης, γνεύσιος, ασβεστόλιθος
Μέση αντοχή	60-100	Ψαμμίτης, μαρμαρυγιακός σχιστόλιθος, μαργαϊκός ασβεστόλιθος
Χαμηλή αντοχή	20-60	Ψαμμίτης μέτρια συνεκτικός, τόφφος, ιλυόλιθος, αργιλικός σχιστόλιθος
Πολύ χαμηλή αντοχή	<20	Ιλυόλιθος, αργιλικός σχιστόλιθος, κρητίν, ορυκτό αλάτι, αποσαθρωμένα πετρώματα
	<20	Μαλακοί βράχοι
	<1	Έδαφος

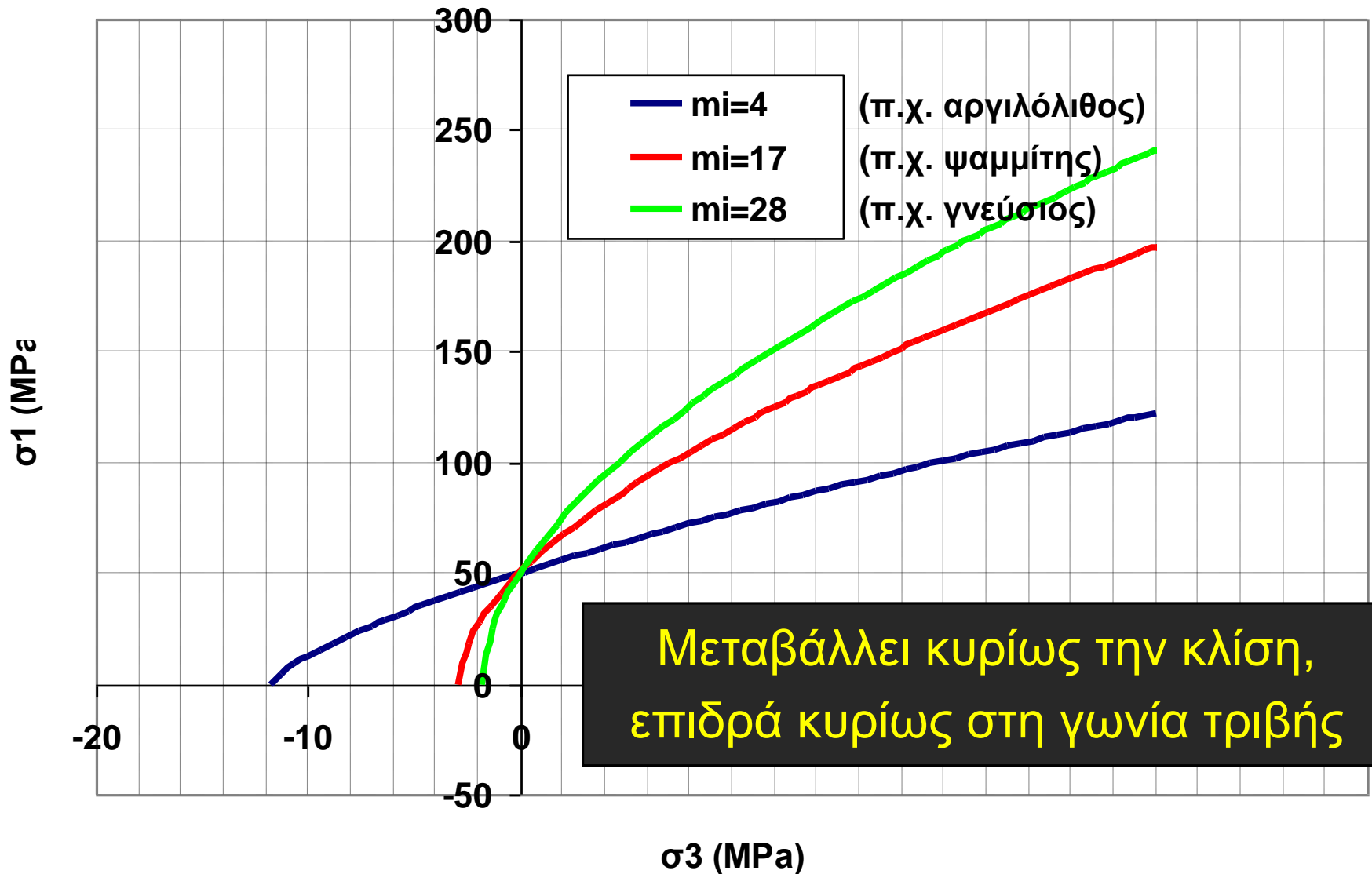
Από, Hoek & Marinos, 2000

Τύπος	Ομάδα	ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑ				
		Χονδρή	Μέση	Λεπτή	Πολύ λεπτή	
ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΗ	Κλαστικό	Κροκαλοπαγή *	Ψαμμίτες 17 ± 4	Ιλυόλιθοι 7 ± 2	Αργιλόλιθοι 4 ± 2	
		Λατυποπαγή *		Γραουβάκες (18 ± 3)	Αργ.σχιστόλιθοι (6 ± 2) Μάργες (7 ± 2)	
	Μη κλαστικό	Ανθρακικά	Κρυσταλλικοί Ασβεστόλιθοι (12 ± 3)	Σπαριτικοί Ασβεστόλιθοι (10 ± 2)	Μικριτικοί Ασβεστόλιθοι (9 ± 2)	Δολομίτες (9 ± 3)
		Εβαπορίτες		Γύψος 8 ± 2	Ανυδρίτης 12 ± 2	
	Οργανικά				Κρητίν 7 ± 2	
ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΜΕΝΑ	Μη πτυχωμένα	Μάρμαρο 9 ± 3	Κερατόλιθοι (19 ± 4) Μεταψαμμίτες (19 ± 3)	Χαλαζίτες 20 ± 3		
	Ελαφρά πτυχωμένα	Μιγματίτες (29 ± 3)	Αμφιβολίτες 26 ± 6	Γνεύσιοι 28 ± 5		
	Πτυχωμένα**		Σχιστόλιθοι 12 ± 3	Φυλλίτες (7 ± 3)	Σχίστες 7 ± 4	
Τύπος	Ομάδα	ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑ				
		Χονδρή	Μέση	Λεπτή	Πολύ λεπτή	
ΠΥΡΙΓΕΝΗ	Πλουτώνια	Ανοικτό- χρωμα	Γρανίτης 32 ± 3	Διορίτης 25 ± 5		
		Σκοτεινό- χρωμα	Γάββρος 27 ± 3 Νορίτης 20 ± 5	Δολερίτης (16 ± 5)		
	Υποαβυσσικά	Πορφύρης (20 ± 5)		Διαβάσης (15 ± 5)	Περιδοίτης (25 ± 5)	
	Ηφαιστειακά	Λάβα		Ρυόλιθος (25 ± 5) Ανδεσίτης 25 ± 5	Δακίτης (25 ± 3) Βασάλτης (25 ± 5)	
		Πυροκλαστικά	Κροκαλοπαγή (19 ± 3)	Ηφ.Λατυποπαγή (19 ± 5)	Τόφφοι (13 ± 5)	

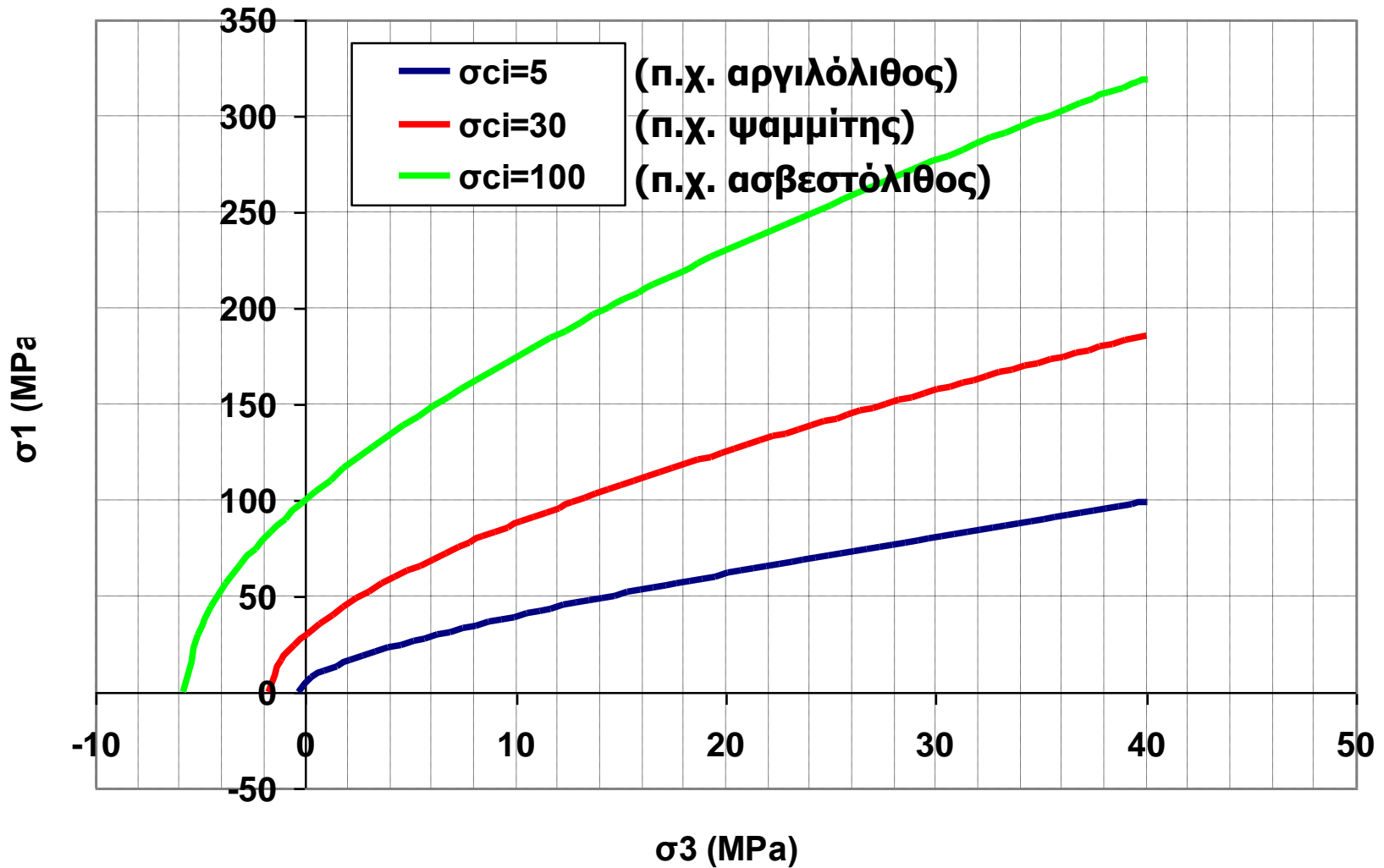
Τιμή σταθεράς m_i
ανά πέτρωμα
(εξαρτάται από τον βαθμό
αλληλοκλειδώματος των
κόκκων)

Hoek and Marinos, 2000

Επίδραση σταθεράς υλικού m_i



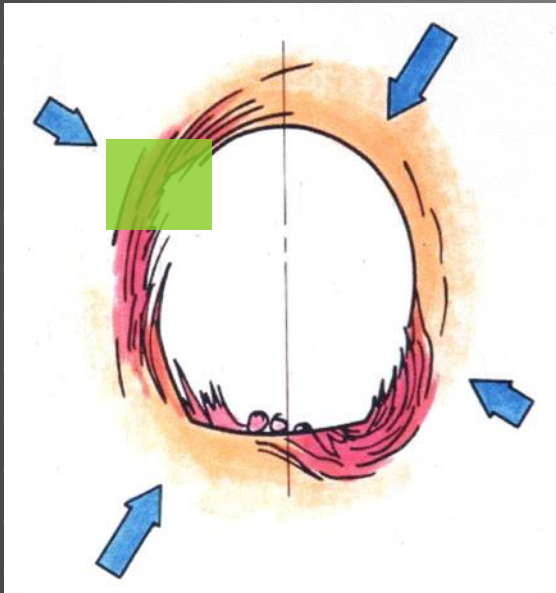
Επίδραση σ_{ci}



Τύπος αστοχίας άρρηκτου βράχου

Εκτίναξη βράχου (rock burst)

Η φαθυρή θραύση συμβαίνει ως αποτέλεσμα της ανάπτυξης ρωγμών κατά μήκος του συμπαγούς βράχου. Οι ασυνέχειες αυτές στον βράχο αναπτύσσονται στην "τροχιά" της μέγιστης κυρίας τάσης δημιουργώντας λεπτές πλάκες.



Σημειώσεις Ε. Hoek από το διαδίκτυο, 2007



Σήραγγα Bredetto, Ελβετία. Βάθος ~1500m

Εκτίναξη βράχου (rock burst)

Διατμητικό τασικό κριτήριο, T_s

$T_s (\sigma_0/\sigma_c)$	Διακινδύνευση (risk) εκτίναξης βράχου
$<0,3$	Καμία
$0,5 \geq T_s > 0,3$	Ασθενή εκτίναξη
$0,7 \geq T_s > 0,5$	Ισχυρή εκτίναξη
$T_s > 0,7$	Βίαιη εκτίναξη

Από Kaiser et al., 2000

$$T_s = \frac{\sigma_0}{\sigma_c}$$

σ_0 = Εφαπτομενικές τάσεις στην επιφάνεια της εκσκαφής.
 σ_c = Μονοαξονική θλιπτική αντοχή.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βιβλία - Σημειώσεις

- ◎ Hoek, E., 2007. Practical Rock Engineering. Notes on Internet (www.rocscience.com/hoek/hoek.asp).
- ◎ Hoek, E., Brown, E.T., 1980. Underground excavations in rock. Institution of Mining and Metallurgy, London.
- ◎ Hudson A.J, and Harrison P.J, 1997. Engineering rock mechanics.
- ◎ Γ. Τσιαμπάος. Σημειώσεις – Παρουσιάσεις Τεχνικής Γεωλογίας, Σχολή Πολ. Μηχανικών ΕΜΠ.
- ◎ Νομικός, Π. (2016). Εισαγωγή στη μηχανική των πετρωμάτων.

Δημοσιεύσεις

- ◎ 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.
- ◎ Kaiser, P.K., Diederichs, M.S., Martin, D., Sharp, J. and Steiner, W., 2000. Underground works in hard rock tunnelling and mining. Proc. GeoEng2000, pp 841-926, Melbourne, Technomic publishers, Lancaster.