



Σχεδιασμός Υπογείων Έργων

Αντώνης Ζερβός

Διαφάνειες βασισμένες σε διδακτικό υλικό του Καθηγ. Β. Παπαδόπουλου

Σχετικά με τον διδάσκοντα

- ΕΜΠ: Δίπλωμα 1996, Διδακτορικό 2001
- Βιομηχανία Ενέργειας: 1996-2002
 - Schlumberger Cambridge Research Ltd
 - Προβλήματα Γεωμηχανικής σχετικά με την εξόρυξη υδρογονανθράκων.
- Πανεπιστήμιο του Southampton: 2002-2023
 - Επίκουρος/Αναπληρωτής Καθηγητής.
 - Μηχανική, Εδαφομηχανική, Πεπερασμένα Στοιχεία.
 - (Μικρο)μηχανική των κοκκωδών υλικών, μηχανική των κατολισθήσεων σε στεριά και υποθαλάσσια, μηχανική του σιδηροδρομικού σκυροστρώματος.
- ΕΜΠ: Ιούνιος 2023 – τώρα
 - Επίκουρος Καθηγητής, Τομέας Γεωτεχνικής.

Σχετικά με το μάθημα

Τις επόμενες 4 εβδομάδες θα καλύψουμε:

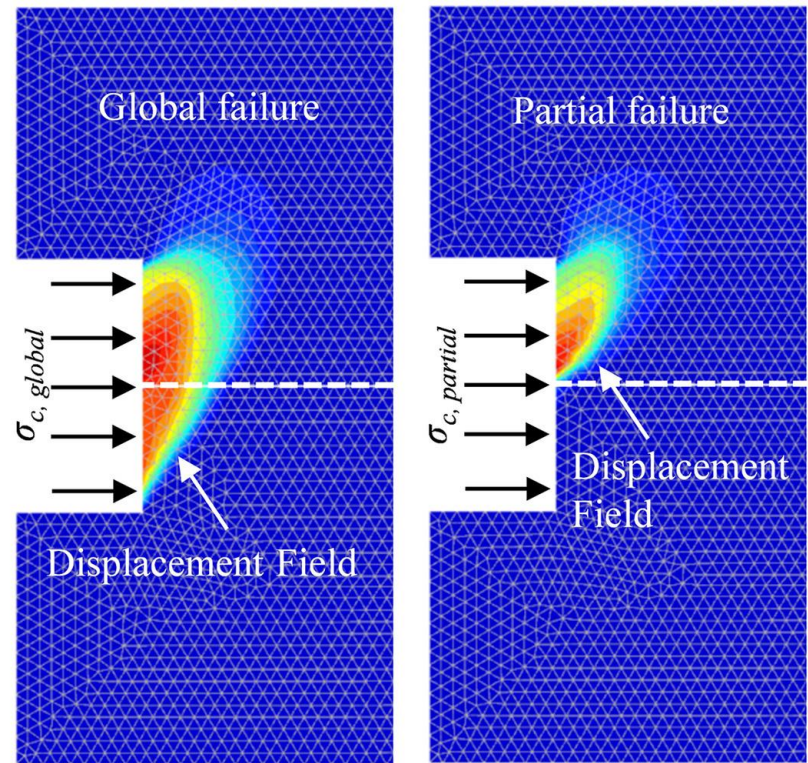
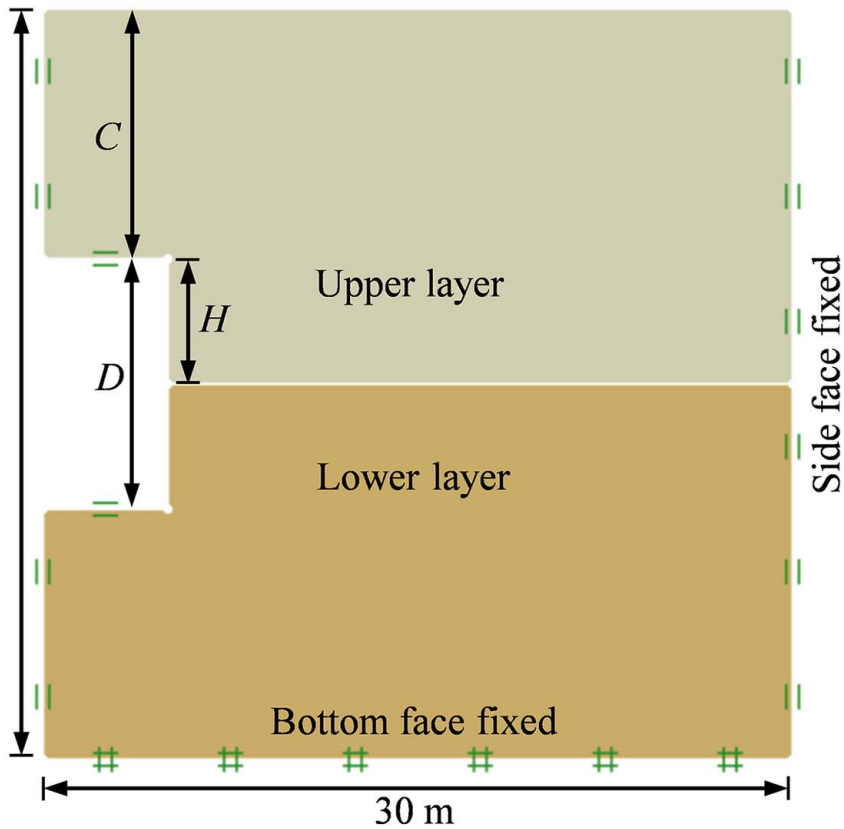
- Κριτήρια αστοχίας
 - Mohr-Coulomb, Griffith.
 - Hoek-Brown.
- Ελαστικές λύσεις τάσεων και παραμορφώσεων γύρω από σήραγγα.
- Γραμμή σύγκλισης-αποτόνωσης.
- Πιέσεις επί της υποστήριξης σηράγγων.

ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ

Σχεδιασμός

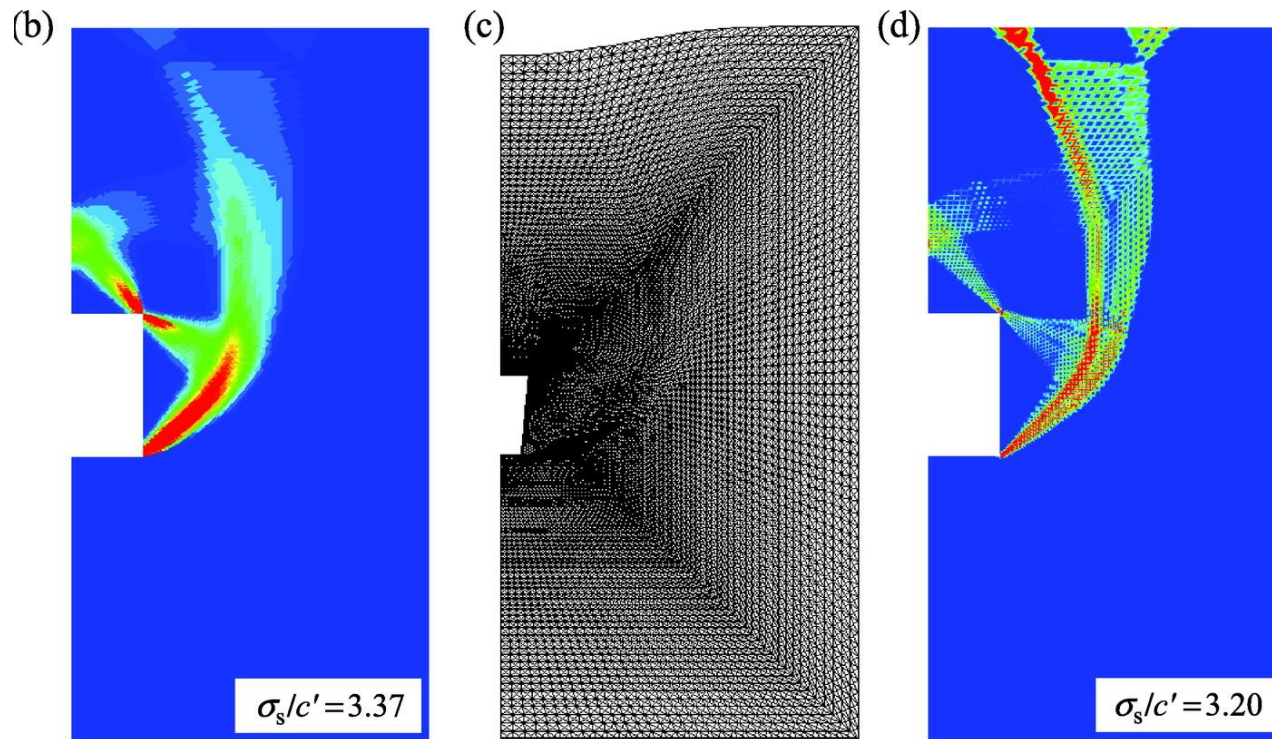
(Κατά τα συνήθη) στόχος μας είναι να:

- Αποφύγουμε αστοχία του υλικού και κατ' επέκταση του έργου.
- Περιορίσουμε σε ανεκτά επίπεδα τις παραμορφώσεις:
 - Του έργου (π.χ. σύγκλιση σήραγγας)
 - Της επιφάνειας του εδάφους (καθιζήσεις) λόγω του έργου.



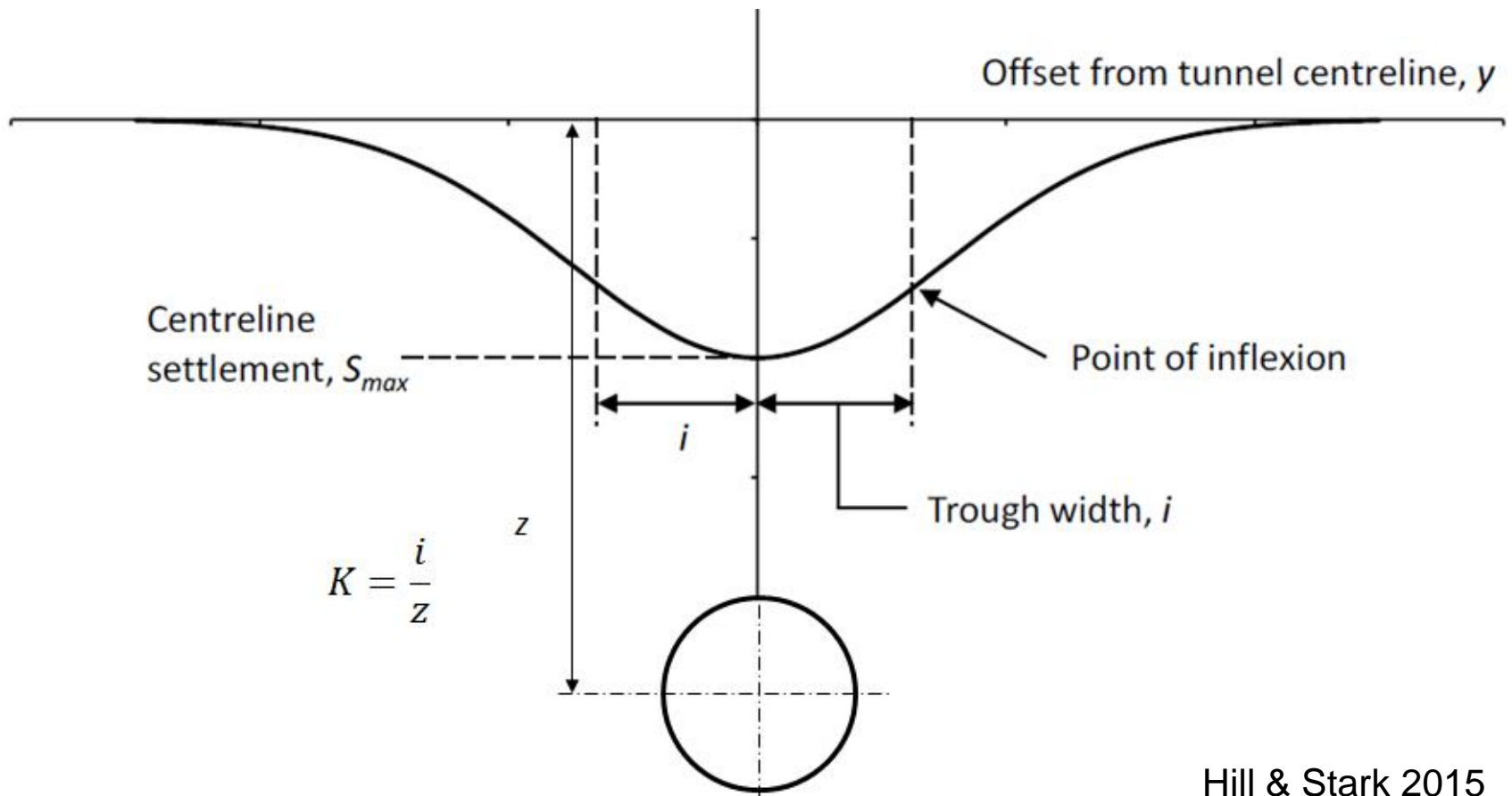
Zhang et al 2024

Καθολική / μερική αστοχία του μετώπου



Yamamoto etal 2011

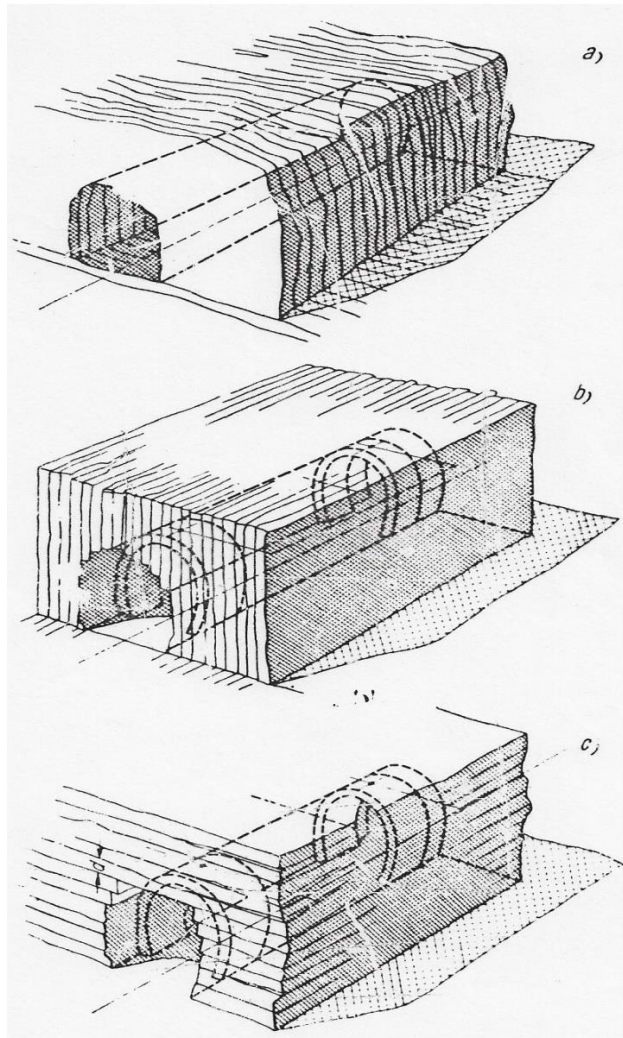
Αστοχία σήραγγας



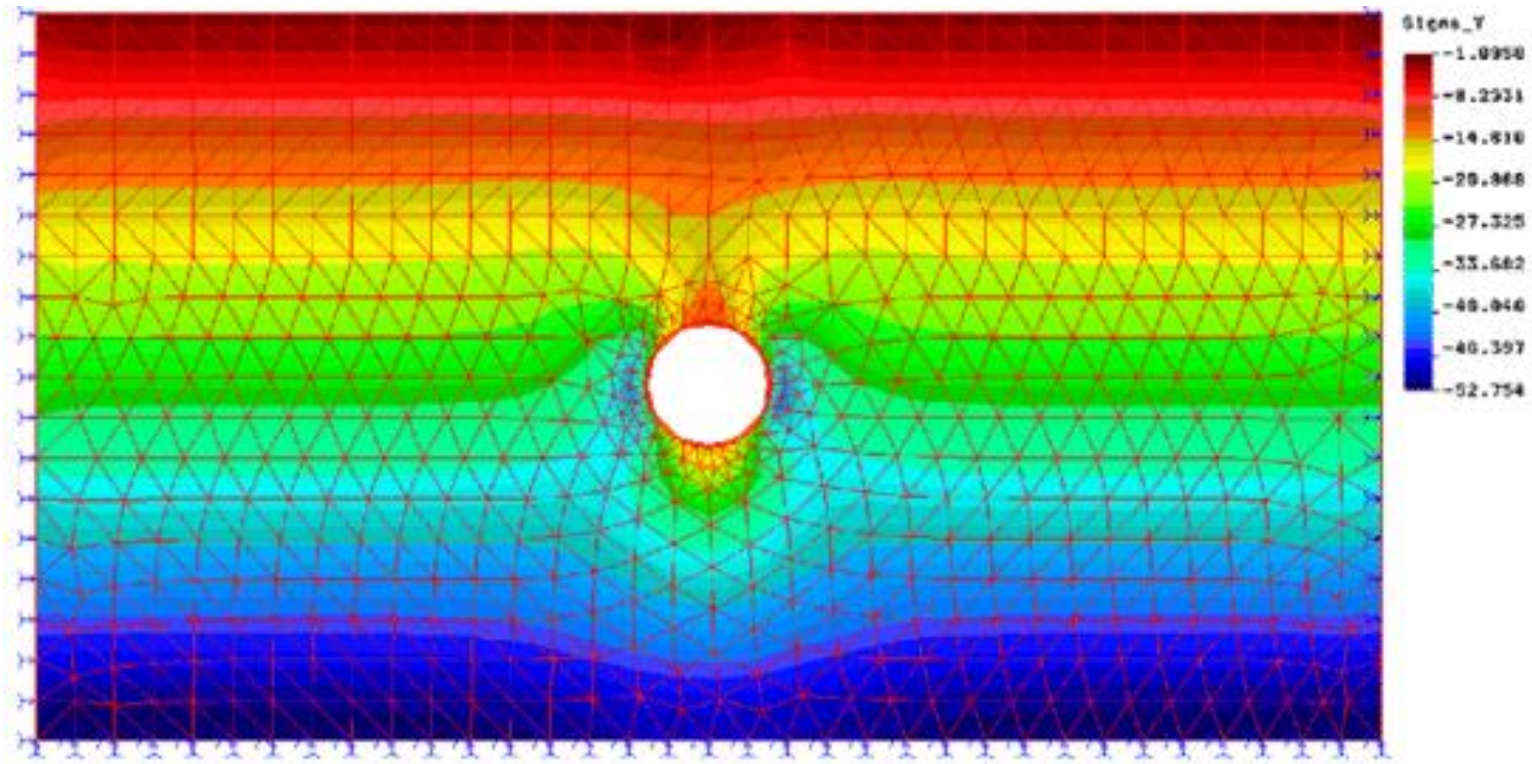
Καθίζηση της επιφάνειας του εδάφους

Παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των υπογείων έργων:

- Συνθήκες του βράχου-βραχομάζας
- Αρχικές τάσεις
- Διαστάσεις και μορφή των υπογείων ανοιγμάτων
- Μέθοδος κατασκευής και υποστήριξης.



Επίδραση του
προσανατολισμού των
ασυνεχειών.

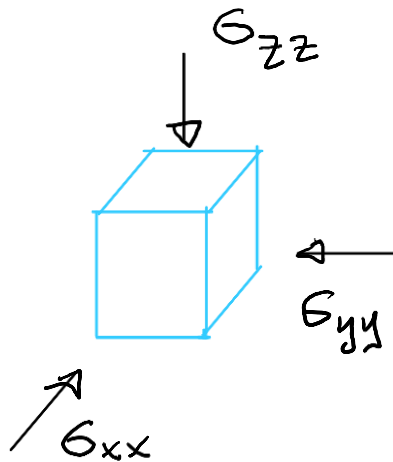
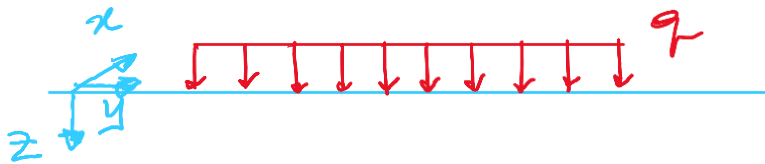


Mazek and Almannaei, 2013

Κατακόρυφες τάσεις μετά την
κατασκευή σήραγγας

Οριζόντιες τάσεις

- Γεωστατικές συνθήκες με ενδεχόμενη επιφανειακή φόρτιση:
 - Συνθήκες μονοδιάστατης συμπίεσης



- $\sigma'_{xx} = \sigma'_{yy} = K_0 \sigma'_{zz}$
 - Συμμετρία
 - K_0 : συντελεστής ουδέτερης ώθησης.
 - Ο K_0 εφαρμόζεται στις ενεργές τάσεις!

Υποθέτοντας γραμμικά ελαστικό υλικό σε μονοδιάστατη συμπίεση κατά τον άξονα-z:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{1}{E} [\sigma_{xx} - \nu(\sigma_{yy} + \sigma_{zz})] = 0 \Rightarrow \sigma_{xx} = \nu(\sigma_{yy} + \sigma_{zz})$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{1}{E} [\sigma_{yy} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{zz})] = 0 \Rightarrow \sigma_{yy} = \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{zz})$$

Και τελικά: $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_{zz} \Rightarrow K_0 = \frac{\nu}{1-\nu}$

- Τα γεωυλικά κατά κανόνα δεν είναι γραμμικά ελαστικά.
- Η τιμή του K_0 εξαρτάται από την ιστορία φόρτισης (δεν είναι σταθερή).
 - Κανονική στερεοποίηση: $K_0 = 1 - \sin \varphi$
 - Προστερεοποίηση: $K_0 = (1 - \sin \varphi) \cdot OCR^{\sin \varphi}$
 - Βράχοι: μετρήσεις των επιτόπου τάσεων
- Η τιμή του K_0 αυξάνει με την προφόρτιση.
 - Ο κύκλος φόρτισης-αποφόρτισης αφήνει «κλειδωμένες» οριζόντιες τάσεις.
 - Η προφόρτιση μπορεί να οδηγήσει σε $K_0 > 1!$

ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Κριτήρια αστοχίας

Περιγράφουν συνδυασμούς τάσεων που αντιστοιχούν σε κατάσταση αστοχίας.

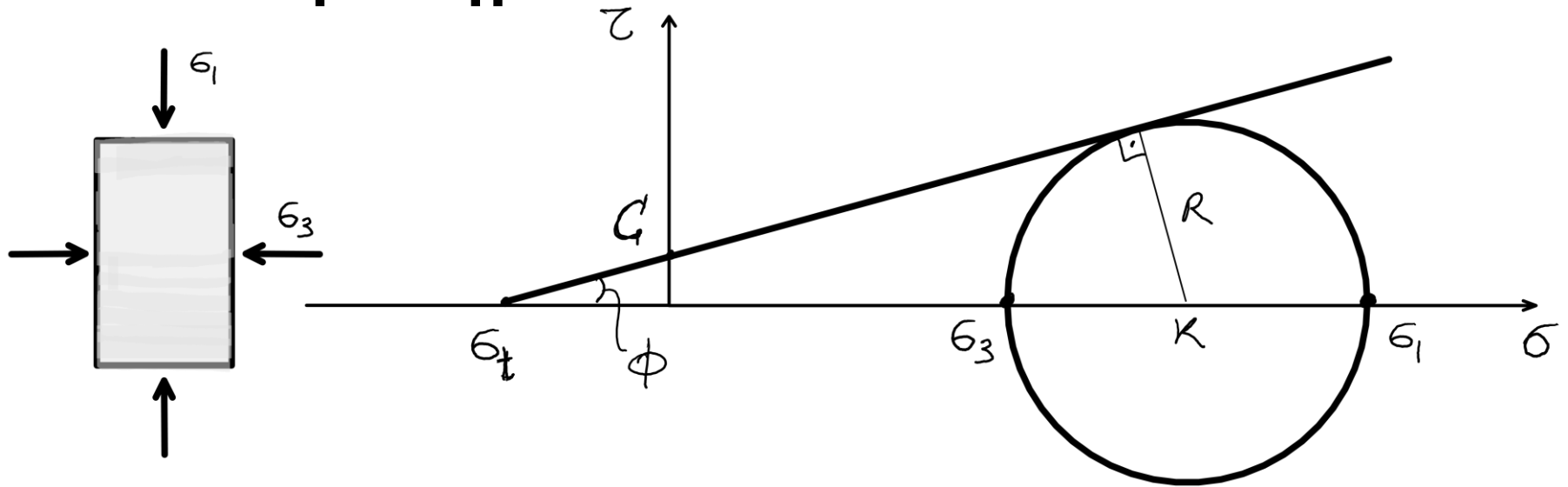
Θεωρητικά:

- Mohr-Coulomb
- Griffith

(Ημι)εμπειρικό:

- Hoek-Brown

Κριτήριο Mohr-Coulomb



Αστοχία επέρχεται όταν η διατμητική τάση σε ένα επίπεδο φτάσει το όριο:

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi$$

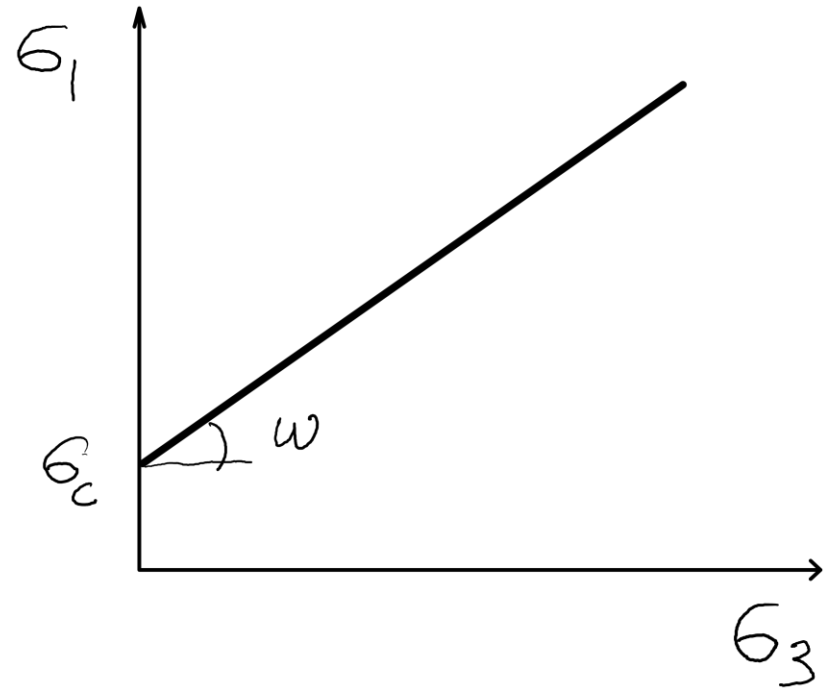
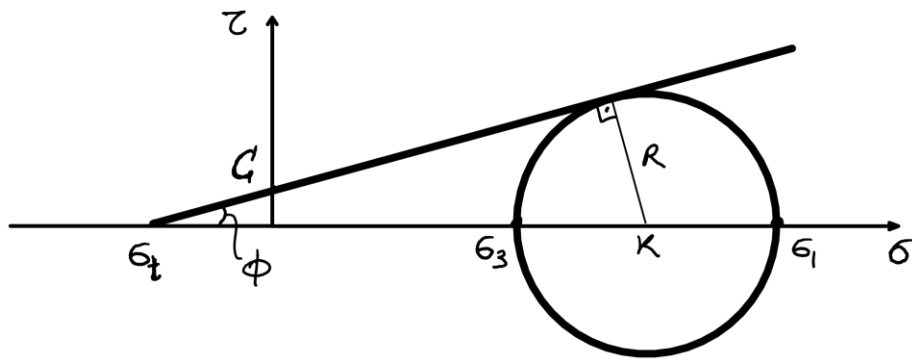
όπου

c : συνοχή.

φ : γωνία τριβής.

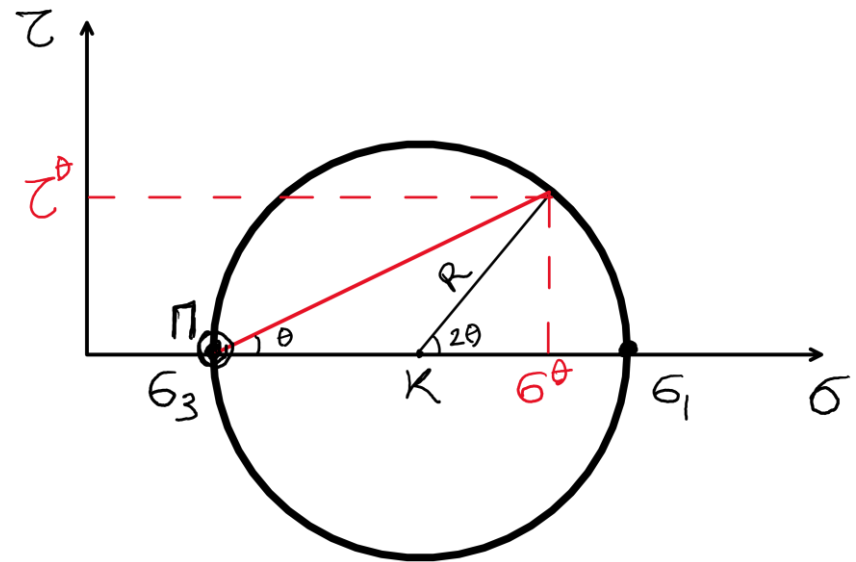
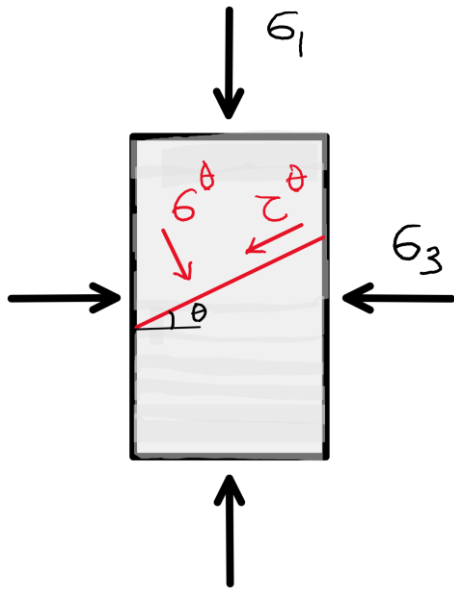
σ_t : αντοχή σε εφελκυσμό (εξαρτώμενη από τα c , φ).

σ : η ορθή τάση σε αυτό το επίπεδο.



Εναλλακτικά, χρησιμοποιώντας γεωμετρία,

$$\sigma_1 = \left(\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right) \sigma_3 + 2c \left(\frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \right) = \sigma_3 \tan \omega + \sigma_c$$



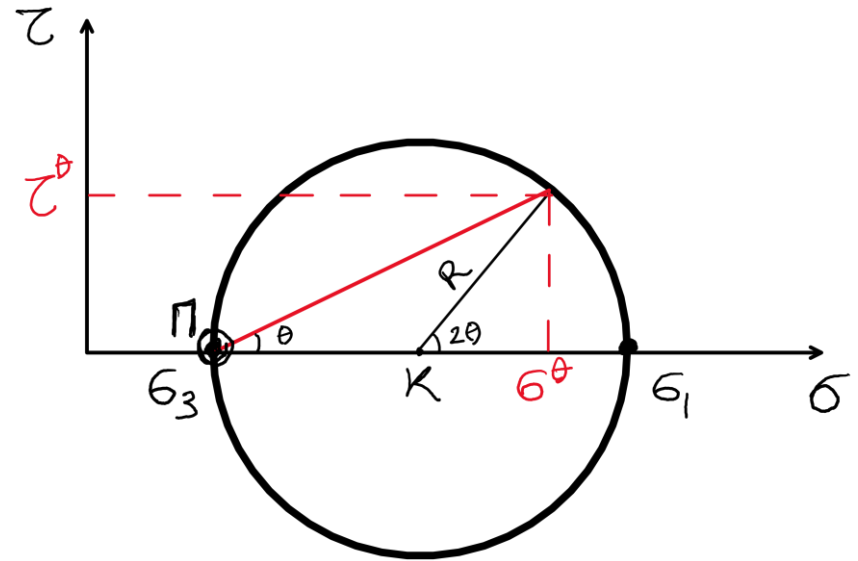
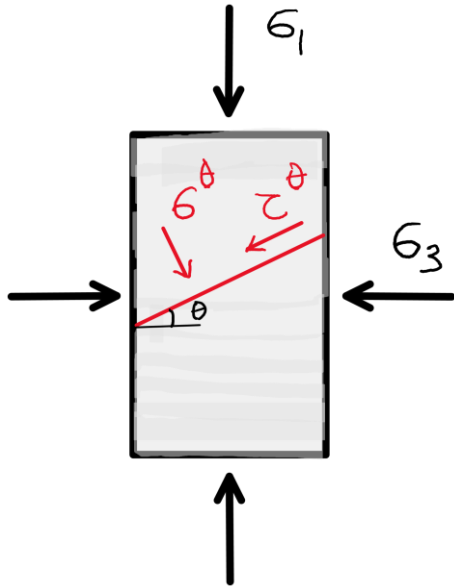
Αστοχία ασυνέχειας με κλίση θ :

$$\tau^{\theta} = c + \sigma^{\theta} \tan \varphi$$

όπου από τον κύκλο Mohr:

$$\tau^{\theta} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\theta$$

$$\sigma^{\theta} = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\theta$$



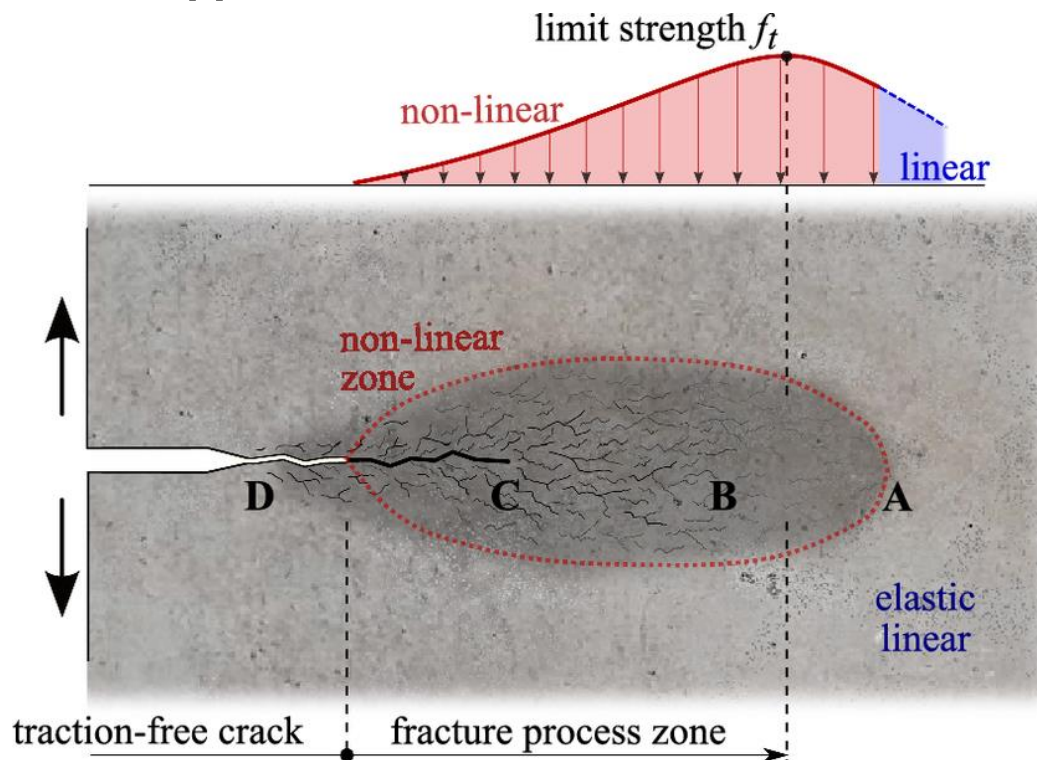
Εναλλακτικά, αντικαθιστώντας:

$$\sigma_1 = \frac{2c + [\sin 2\theta + (1 - \cos 2\theta) \tan \varphi] \cdot \sigma_3}{[\sin 2\theta - (1 + \cos 2\theta) \tan \varphi]}$$

Κριτήριο Griffith

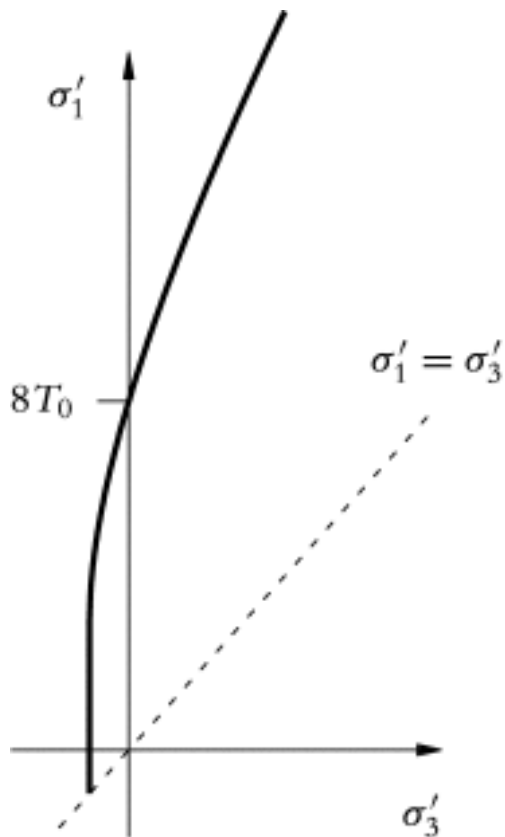
Υποθέτουμε την ύπαρξη ατελειών (ελλειπτικές μικρορωγμές).

Όταν η εφελκυστική τάση στην αιχμή φτάσει μια τιμή χαρακτηριστική για το υλικό, η ρωγμή επεκτείνεται και τελικά οδηγεί σε αστοχία.



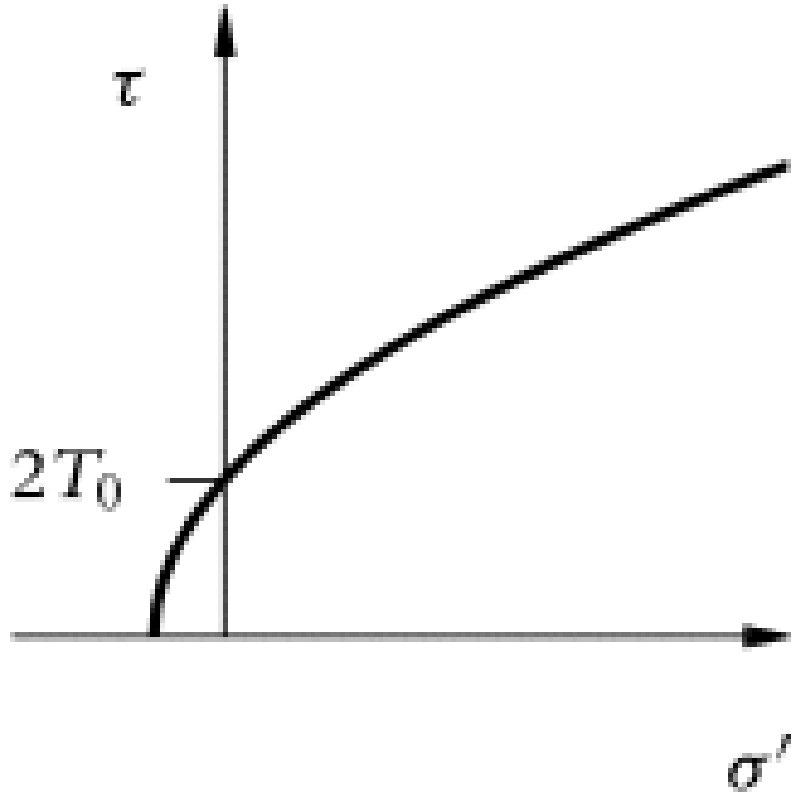
Σύμφωνα με το κριτήριο Griffith, αστοχία επέρχεται όταν:

$$\begin{cases} \sigma_3 = -T_0, & \sigma_1 + 3\sigma_3 \leq 0 \\ (\sigma_1 - \sigma_3)^2 = 8T_0(\sigma_1 + \sigma_3), & \sigma_1 + 3\sigma_3 > 0 \end{cases}$$



Αντοχή σε εφελκυσμό: T_0

Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη:
 $\sigma_3 = 0 \Rightarrow C_0 = \sigma_1 = 8T_0$



Εναλλακτικά, σε
όρους (σ, τ):

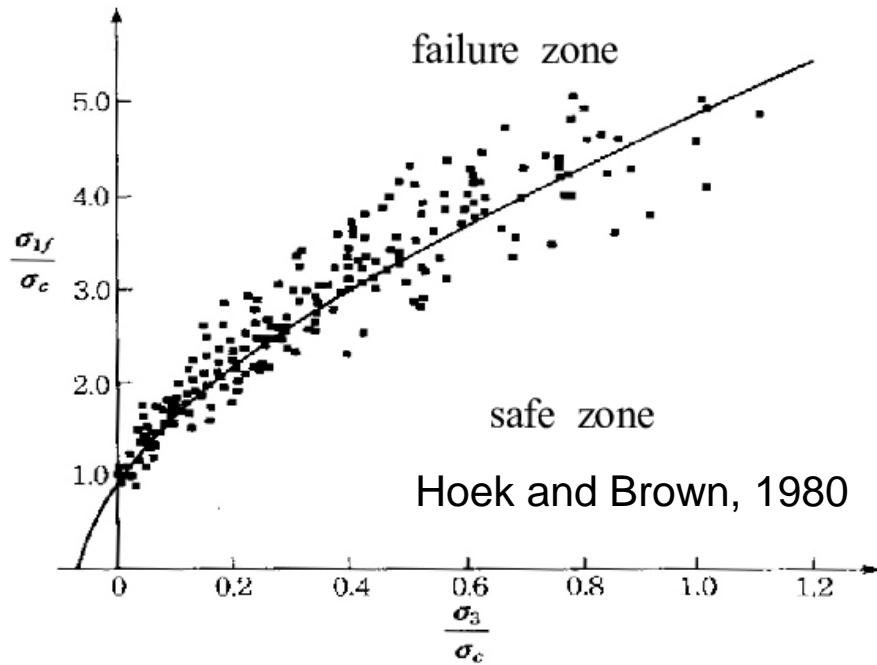
$$\tau^2 = 4T_0(\sigma + T_0)$$

Fjaer et al, 2021

Αντοχή σε εφελκυσμό: T_0

Συνοχή: $2T_0$

Κριτήριο Hoek-Brown



Για άρρηκτο βράχο:

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

σ_c : Αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη.

m_i : Παράμετρος του υλικού.

- Εκτίμηση από πίνακες (π.χ. επόμενη διαφάνεια).
- Εκτίμηση από εργαστηριακές μετρήσεις.

Table 2: Values of the constant m_i for intact rock, by rock group⁴. Note that values in parenthesis are estimates. The range of values quoted for each material depends upon the granularity and interlocking of the crystal structure – the higher values being associated with tightly interlocked and more frictional characteristics.

Rock type	Class	Group	Texture			
			Coarse	Medium	Fine	Very fine
SEDIMENTARY	Clastic		Conglomerates *	Sandstones 17 ± 4	Siltstones 7 ± 2	Claystones 4 ± 2
			Breccias *		Greywackes (18 ± 3)	Shales (6 ± 2) Marls (7 ± 2)
	Non-Clastic	Carbonates	Crystalline Limestone (12 ± 3)	Sparitic Limestones (10 ± 2)	Micritic Limestones (9 ± 2)	Dolomites (9 ± 3)
		Evaporites		Gypsum 8 ± 2	Anhydrite 12 ± 2	
	Organic				Chalk 7 ± 2	
METAMORPHIC	Non Foliated		Marble 9 ± 3	Hornfels (19 ± 4) Metasandstone (19 ± 3)	Quartzites 20 ± 3	
	Slightly foliated		Migmatite (29 ± 3)	Amphibolites 26 ± 6	Gneiss 28 ± 5	
	Foliated**			Schists 12 ± 3	Phyllites (7 ± 3)	Slates 7 ± 4
IGNEOUS	Plutonic	Light	Granite 32 ± 3	Diorite 25 ± 5	Granodiorite (29 ± 3)	
		Dark	Gabbro 27 ± 3 Norite 20 ± 5	Dolerite (16 ± 5)		
	Hypabyssal		Porphyries (20 ± 5)		Diabase (15 ± 5)	Peridotite (25 ± 5)
	Volcanic	Lava		Rhyolite (25 ± 5) Andesite 25 ± 5	Dacite (25 ± 3) Basalt (25 ± 5)	
		Pyroclastic	Agglomerate (19 ± 3)	Breccia (19 ± 5)	Tuff (13 ± 5)	

* Conglomerates and breccias may present a wide range of m_i values depending on the nature of the cementing material and the degree of cementation, so they may range from values similar to sandstone, to values used for fine grained sediments (even under 10).

** These values are for intact rock specimens tested normal to bedding or foliation. The value of m_i will be significantly different if failure occurs along a weakness plane.

Marinos and Hoek, 2000

⁴ Note that this table contains several changes from previously published versions, These changes have been made to reflect data that has been accumulated from laboratory tests and the experience gained from discussions with geologists and engineering geologists.

Για βραχόμαζα:
$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_b \cdot \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a$$

σ_c : Αντοχή του άρρηκτου βράχου σε ανεμπόδιστη θλίψη.

m_b, s, a : Παράμετροι αντίστοιχες των $(m_i, 1, 0.5)$, απομειωμένες ανάλογα με τη διαφορά βραχόμαζας / άρρηκτου βράχου.

Για βραχόμαζα:
$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_b \cdot \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a$$

$$m_b = m_i \cdot e^{\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right)} < m_i$$

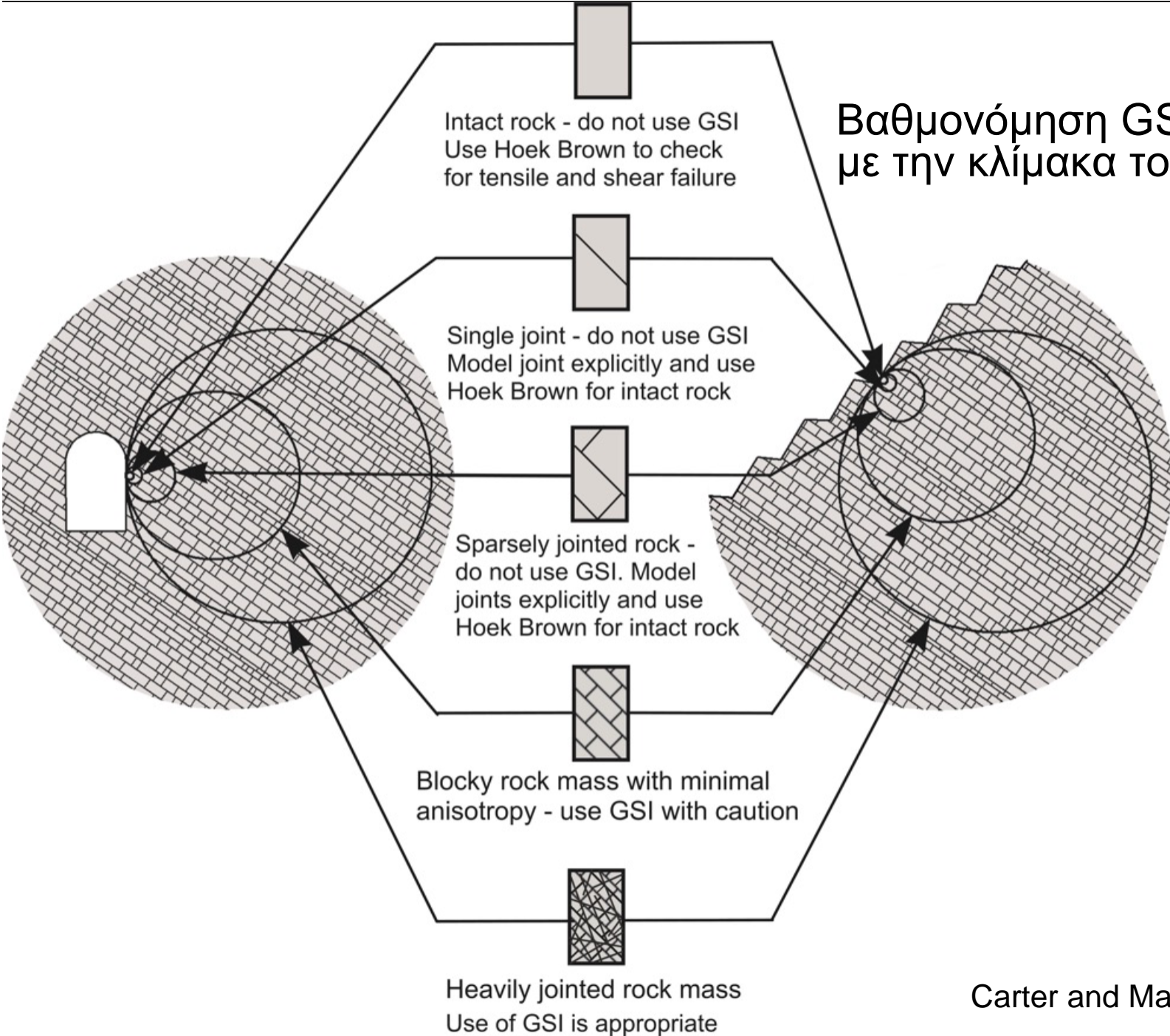
$$s = e^{\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right)} < 1$$






$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right) > 0.5$$

GSI: Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής της βραχόμαζας.

D: Συντελεστής Διατάραξης της βραχόμαζας, $0 \leq D \leq 1$.

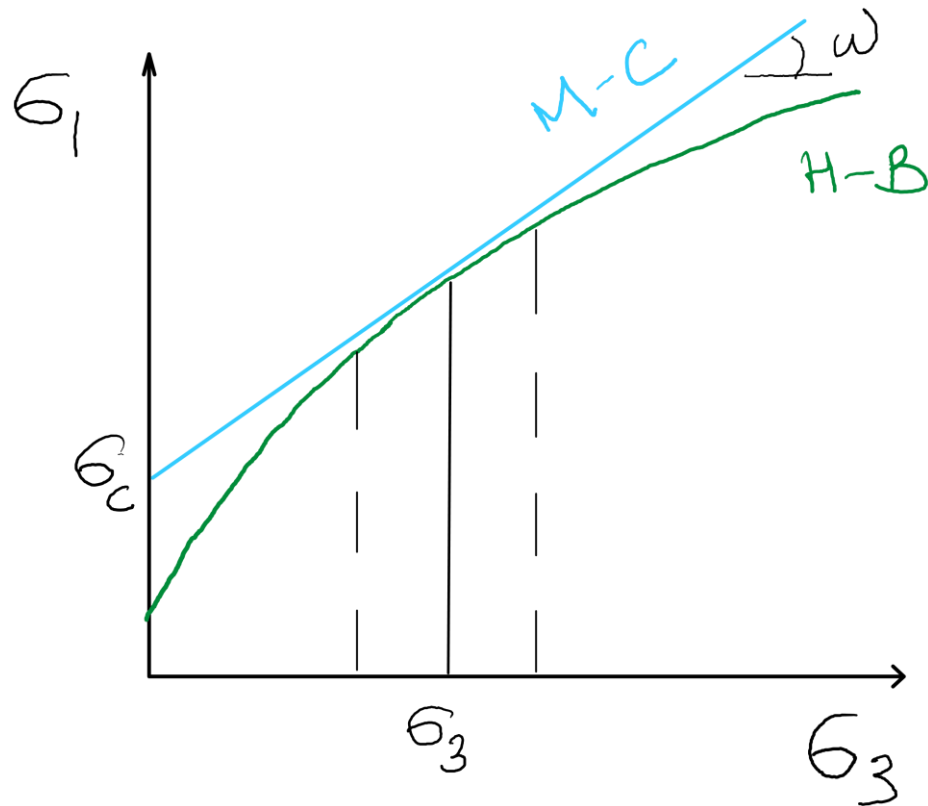
Βαθμονόμηση GSI σύμφωνα με την κλίμακα του έργου!



Appearance of rock mass	Description of rock mass	Suggested value of D
	Excellent quality controlled blasting or excavation by Tunnel Boring Machine results in minimal disturbance to the confined rock mass surrounding a tunnel.	$D = 0$
	Mechanical or hand excavation in poor quality rock masses (no blasting) results in minimal disturbance to the surrounding rock mass. Where squeezing problems result in significant floor heave, disturbance can be severe unless a temporary invert, as shown in the photograph, is placed.	$D = 0$ $D = 0.5$ No invert
	Very poor quality blasting in a hard rock tunnel results in severe local damage, extending 2 or 3 m, in the surrounding rock mass.	$D = 0.8$
	Small scale blasting in civil engineering slopes results in modest rock mass damage, particularly if controlled blasting is used as shown on the left hand side of the photograph. However, stress relief results in some disturbance.	$D = 0.7$ Good blasting $D = 1.0$ Poor blasting
	Very large open pit mine slopes suffer significant disturbance due to heavy production blasting and also due to stress relief from overburden removal. In some softer rocks excavation can be carried out by ripping and dozing and the degree of damage to the slopes is less.	$D = 1.0$ Production blasting $D = 0.7$ Mechanical excavation

Κατευθυντήριες γραμμές για την εκτίμηση του Συντελεστή Διατάραξης D

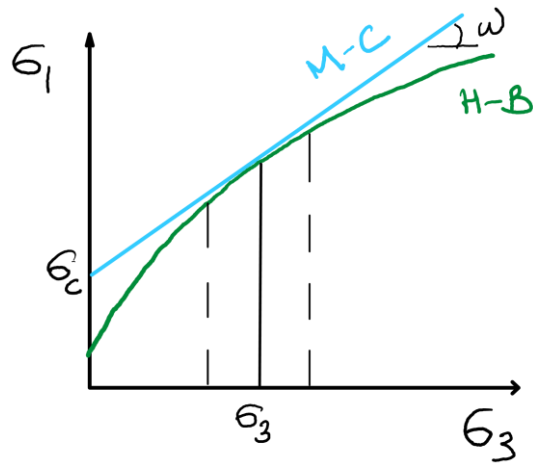
Ισοδύναμες παράμετροι Mohr-Coulomb



Ποια είναι τα ισοδύναμα
(c, φ) περί δεδομένη
τάση σ_3 ;

Θεωρούμε πως στη συγκεκριμένη τάση σ_3 :

- Τα δυο κριτήρια ταυτίζονται (δηλ. $\sigma_1^{M-C} = \sigma_1^{H-B}$)
- Η περιβάλλουσα Mohr-Coulomb **εφάπτεται** της Hoek-Brown.



Ισοδύναμες παράμετροι Mohr-Coulomb

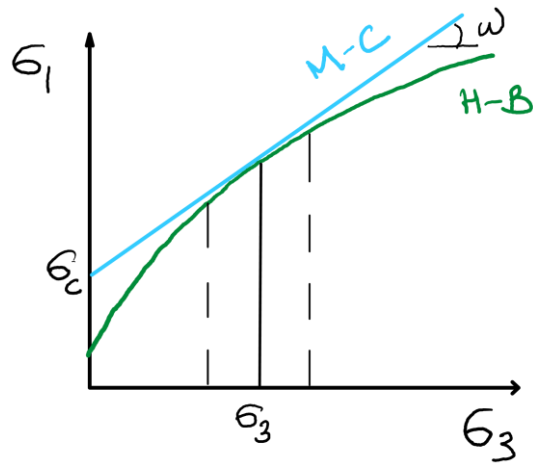
Ποια είναι τα ισοδύναμα (c, φ) περί δεδομένη τάση σ_3 ;

Hoek-Brown:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a \Rightarrow \frac{d\sigma_1}{d\sigma_3} = 1 + a m_b \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^{a-1} = A$$

Mohr-Coulomb:

$$\sigma_1 = \left(\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right) \sigma_3 + 2c \left(\frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \right) = \sigma_3 \tan \omega + \sigma_c \Rightarrow \frac{d\sigma_1}{d\sigma_3} = \tan \omega$$



Ισοδύναμες παράμετροι Mohr-Coulomb

Ποια είναι τα ισοδύναμα (c, φ) περί δεδομένη τάση σ_3 ;

Hoek-Brown:

$$\frac{d\sigma_1}{d\sigma_3} = \tan \omega = 1 + am_b \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^{a-1} = A \Rightarrow \left(\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right) = A \Rightarrow \sin \varphi = \frac{A - 1}{A + 1}$$

Με γνωστό πλέον το φ :

$$\sigma_1^{M-C} = \sigma_1^{H-B} = \left(\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right) \sigma_3 + \frac{2 c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \Rightarrow c = \frac{(1 - \sin \varphi) \sigma_1 - (1 + \sin \varphi) \sigma_3}{2 \cos \varphi}$$

Παράδειγμα: θεωρήστε ψαμμίτη με

$$m_i = 15, \sigma_{c,i} = 60MPa, GSI = 30$$

Υπολογίστε τις ισοδύναμες παραμέτρους
Mohr-Coulomb για $\sigma_3 = 0.6MPa$

Πρώτα γράφουμε το κριτήριο Hoek-Brown
για τη βραχώμαζα:

$$m_b = m_i e^{(GSI-100)/28} = 1.231$$

$$s = e^{(GSI-100)/9} = 4.19 \cdot 10^{-4}$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right) = 0.52$$

$$\sigma_3 = 0.6MPa$$

$$\sigma_{c,i} = 60MPa$$

$$m_b = m_i e^{(GSI-100)/28} = 1.231$$

$$s = e^{(GSI-100)/9} = 4.19 \cdot 10^{-4}$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} (e^{-GSI/15} - e^{-20/3}) = 0.52$$

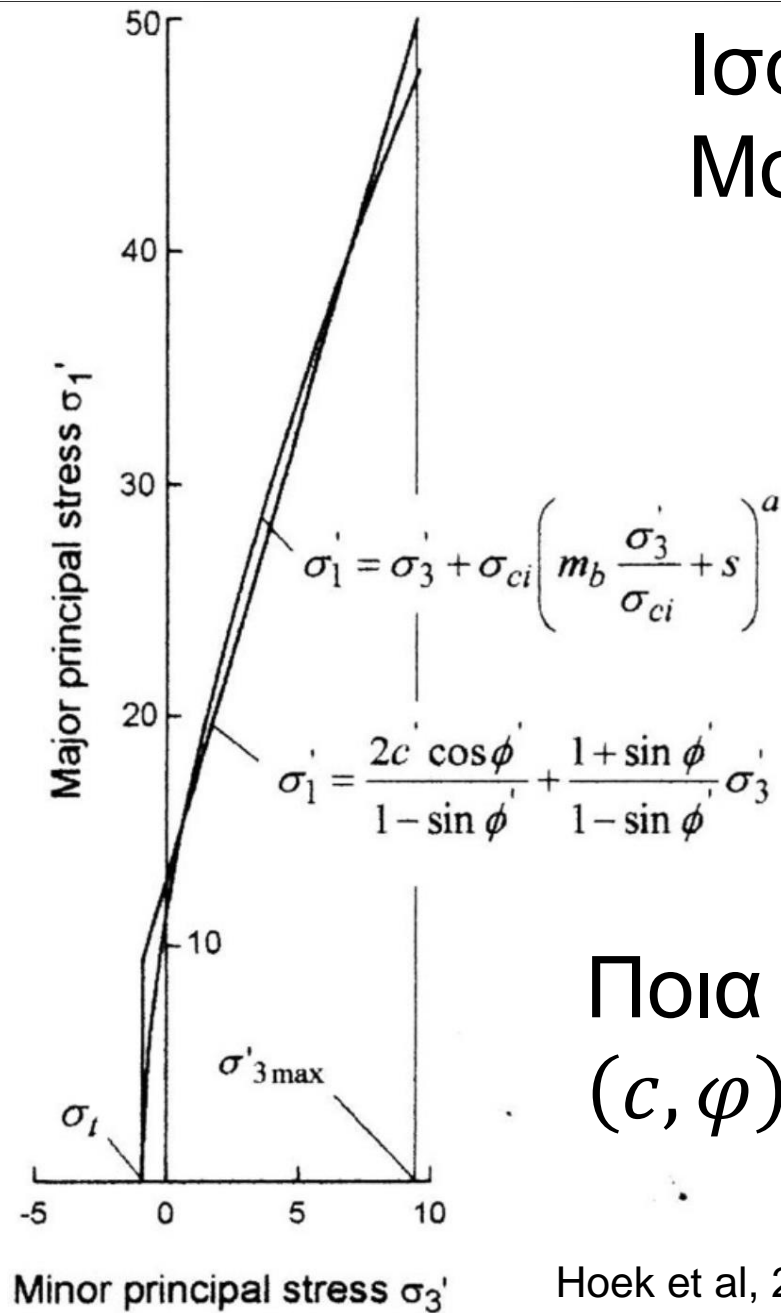
$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{c,i} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a = \dots = 6.804MPa$$

$$A = 1 + am_b \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^{a-1} = \dots = 6.199$$

$$\sin \varphi = \frac{A - 1}{A + 1} = 0.722 \Rightarrow \varphi = 46.2^\circ$$

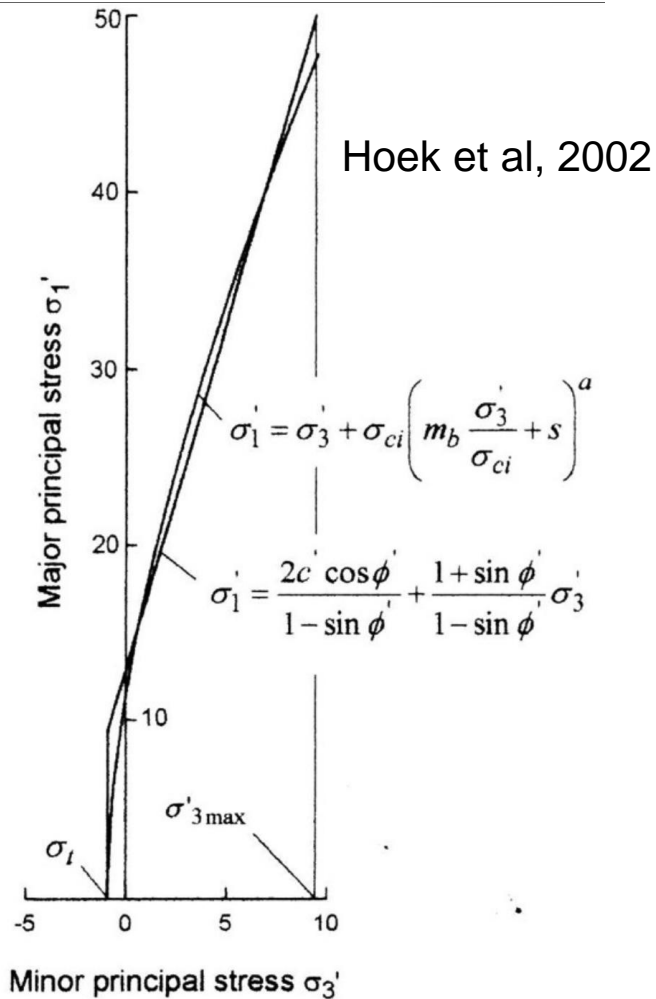
$$c = \frac{(1 - \sin \varphi)\sigma_1 - (1 + \sin \varphi)\sigma_3}{2 \cos \varphi} \Rightarrow c = 0.621MPa$$

Ισοδύναμες παράμετροι Mohr-Coulomb



Ποια είναι τα ισοδύναμα
(c, ϕ) για τάσεις έως $\sigma_{3,max}$;

Ισοδύναμες παράμετροι Mohr-Coulomb



$$\phi' = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b (s + m_b \sigma_{3n}')^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b (s + m_b \sigma_{3n}')^{a-1}} \right]$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci} \left[(1+2a)s + (1-a)m_b \sigma_{3n}' \right] (s + m_b \sigma_{3n}')^{a-1}}{(1+a)(2+a) \sqrt{1 + \left(6am_b (s + m_b \sigma_{3n}')^{a-1} \right) / ((1+a)(2+a))}}$$

$$\sigma_{3n}' = \sigma_{3 \max}' / \sigma_{ci}$$

Ποια είναι τα ισοδύναμα
(c, φ) για τάσεις έως $\sigma_{3, \max}'$;

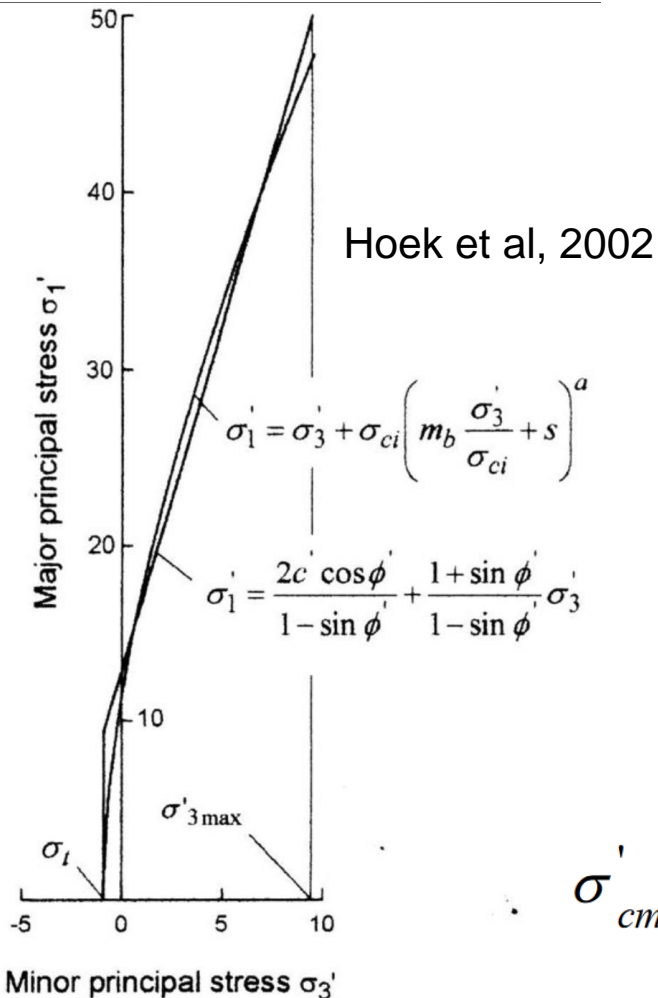
...και πώς υπολογίζουμε την $\sigma_{3,max}$;

Για σήραγγες:

$$\frac{\sigma'_{3max}}{\sigma'_{cm}} = 0.47 \left(\frac{\sigma'_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0.94}$$

Για πρανή:

$$\frac{\sigma'_{3max}}{\sigma'_{cm}} = 0.72 \left(\frac{\sigma'_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0.91}$$

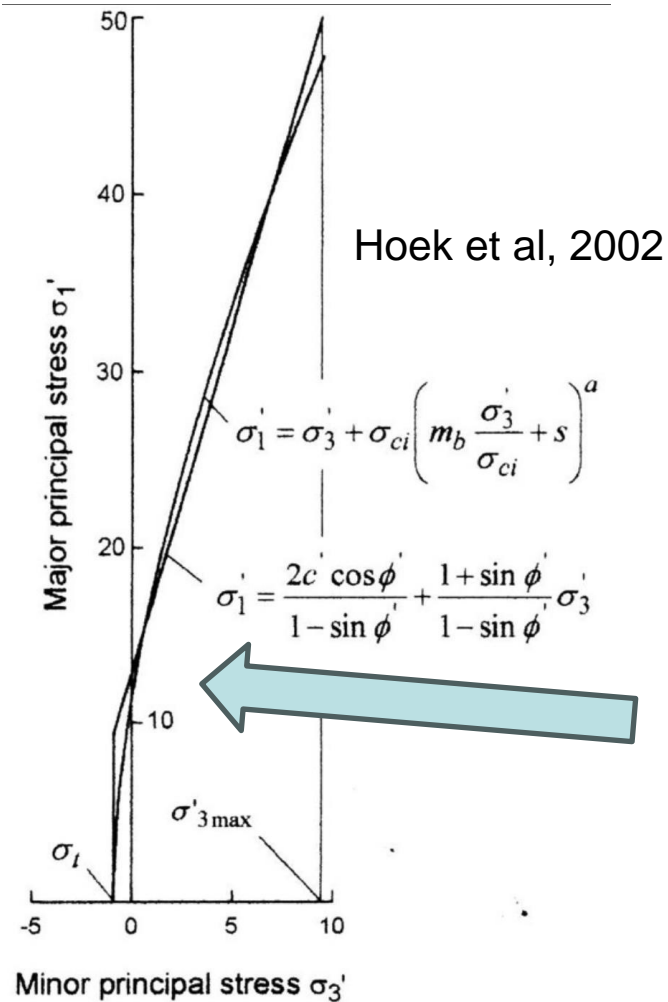


$$\sigma'_{cm} = \sigma_{ci} \cdot \frac{(m_b + 4s - a(m_b - 8s))(m_b/4 + s)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)}$$

γ το ειδικό βάρος της βραχώμαζας,

H το βάθος της σήραγγας / ύψος του πρανούς

Ισοδύναμη αντοχή $\sigma_{c,m}$



Χαρακτηριστική της «συνολικής» (όχι «τοπικής») συμπεριφοράς της βραχώμαζας.

$$\sigma_{cm}' = \sigma_{ci} \cdot \frac{(m_b + 4s - a(m_b - 8s))(m_b/4 + s)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)}$$

Προκύπτει για ισοδύναμα (c, ϕ) για τάσεις $\sigma_t < \sigma_3 < \sigma_{ci}/4$

Παράδειγμα: για βραχόμαζα ιλυόλιθου $m_i = 8$, $\sigma_{c,i} = 30\text{MPa}$ και $GSI=40$. **Υπολογίστε** την ισοδύναμη αντοχή $\sigma_{c,m}$.

Γράφουμε το κριτήριο Hoek-Brown για τη βραχόμαζα:

$$m_b = m_i e^{(GSI-100)/28} = 0.657$$

$$s = e^{(GSI-100)/9} = 1.273 \cdot 10^{-3}$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} (e^{-GSI/15} - e^{-20/3}) = 0.511$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{c,i} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a = \sigma_{c,i} (s)^a = 0.995\text{MPa}$$

$$\sigma'_{cm} = \sigma_{ci} \cdot \frac{(m_b + 4s - a(m_b - 8s))(m_b/4 + s)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)} \Rightarrow \sigma_{c,m} = 3.16\text{MPa}$$

Άσκηση-A1: Για σχηματισμό ημιβράχου δίνονται τα εξής αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής θλίψης σε δοκίμια άρρηκτου ημιβράχου:

σ_3 (MPa)	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0
σ_1 (MPa)	3,006	4,011	6,023	10,046	18,091

Δοκιμές σε επιφάνειες ασυνεχειών έδωσαν $\varphi=37^\circ$ και $c=20\text{kPa}$.

- Ισχύει το κριτήριο Mohr-Coulomb για τον άρρηκτο ημίβραχο; Υπολογίστε τις αντίστοιχες παραμέτρους διατμητικής αντοχής.
- Δοκίμια του ημιβράχου με επιφάνεια ασυνέχειας σε γωνία α ως προς τη σ_3 υποβάλλονται σε δοκιμές τριαξονικής θλίψης με $\sigma_3 = 0,2 \text{ MPa}$. Δώστε το διάγραμμα μεταβολής της αποκλίνουσας τάσης ($\sigma_1 - \sigma_3$) κατά την αστοχία ως συνάρτηση της γωνίας α , ($0 \leq \alpha \leq \pi/2$), αφού πρώτα υπολογίσετε την ελάχιστη και μέγιστη τιμή του ($\sigma_1 - \sigma_3$).

Άσκηση-A2: Δοκιμές τριαξονικής θλίψης με $\sigma_3 = 1,0\text{MPa}$ σε δείγματα σχιστόλιθου έδωσαν τα εξής αποτελέσματα:

σ_1 (MPa)	Γωνία επιπέδων σχιστότητας ως προς την σ_3 (°)
35,53	45
18,76	55
16,50	64
20,13	75

Σε όλες τις δοκιμές παρατηρήθηκε αστοχία κατά το επίπεδο σχιστότητας.

Διατυπώστε το κριτήριο αστοχίας του σχιστόλιθου κατά τις επιφάνειες σχιστότητας.

Άσκηση-A3: Στα πλαίσια των ερευνών για την διάνοιξη σήραγγας κυκλικής διατομής 8 m σε ψαμμίτη με $\gamma=25\text{kN/m}^3$ και $GSI=40$ εκτελέστηκαν τριαξονικές δοκιμές σε δοκίμια άρρηκτου ψαμμίτη με τα πιο κάτω αποτελέσματα:

σ_3 (MPa)	0	4,8	14,4	24,0	38,4
σ_1 (MPa)	48,0	79,2	123,8	159,7	206,1

- Να σχεδιαστεί το διάγραμμα σ_1 - σ_3
- Ισχύει το κριτήριο Hoek-Brown για τον ψαμμίτη; Να εκτιμηθούν οι σχετικές σταθερές του υλικού.
- Να διατυπωθεί το αντίστοιχο κριτήριο για τη βραχώμαζα.
- Σε θέση με ύψος υπερκειμένων 56m, να εκτιμηθούν οι ισοδύναμες παράμετροι διατμητικής αντοχής της βραχώμαζας κατά Mohr-Coulomb:
 - Για το κατάλληλο εύρος πλευρικών τάσεων σ_3 .
 - Για συγκεκριμένη πλευρική τάση $\sigma_3=0,35\text{MPa}$.