



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών

Τεκτονική Γεωλογία

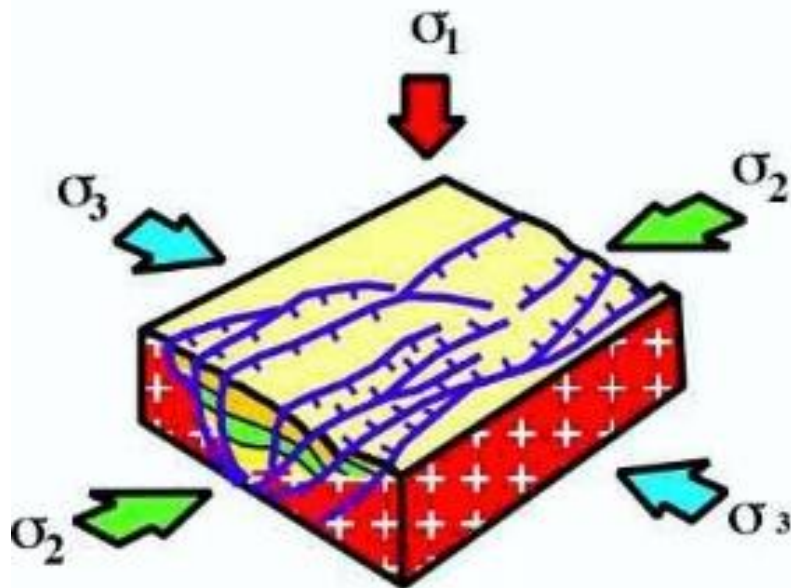
Ενότητα 2: Δυνάμεις και Τάσεις

Στυλιανός Λόζιος

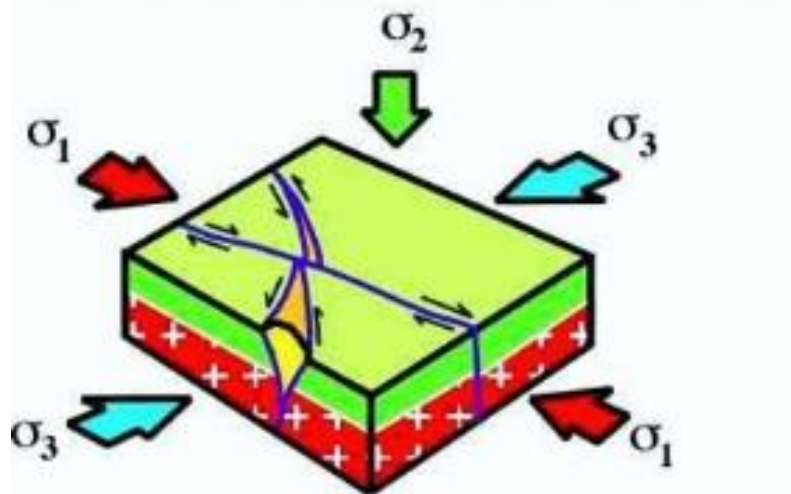
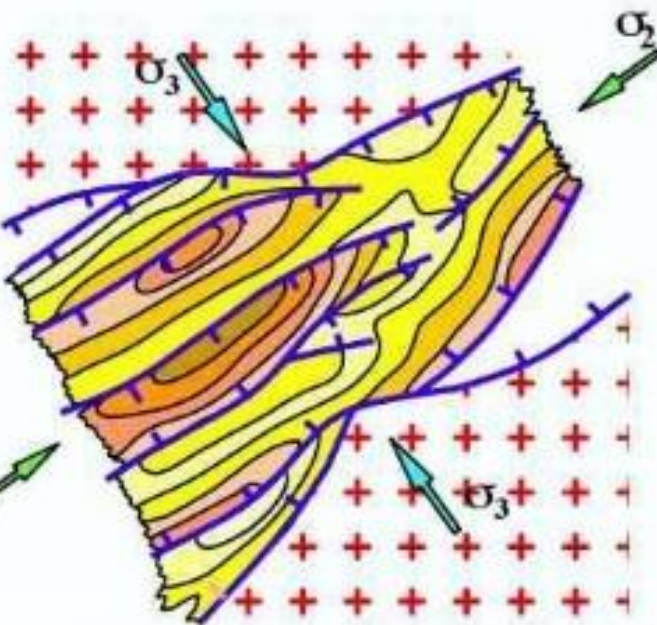
Σχολή Θετικών Επιστημών

Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος

Δυνάμεις και Τάσεις

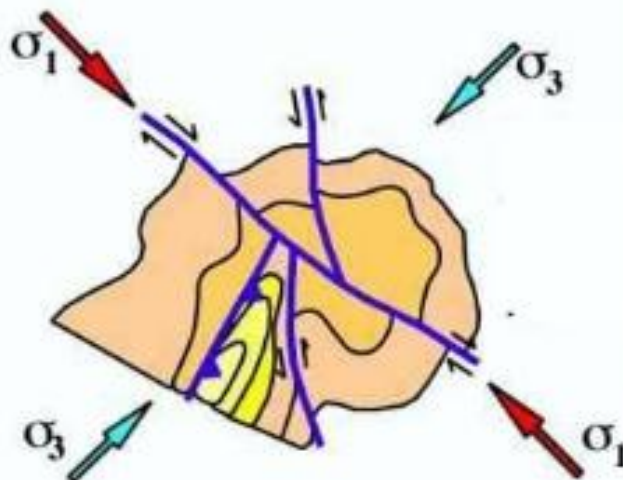


σ_1 vertical



The throw is not constant along strike slip faults

σ_1 horizontal



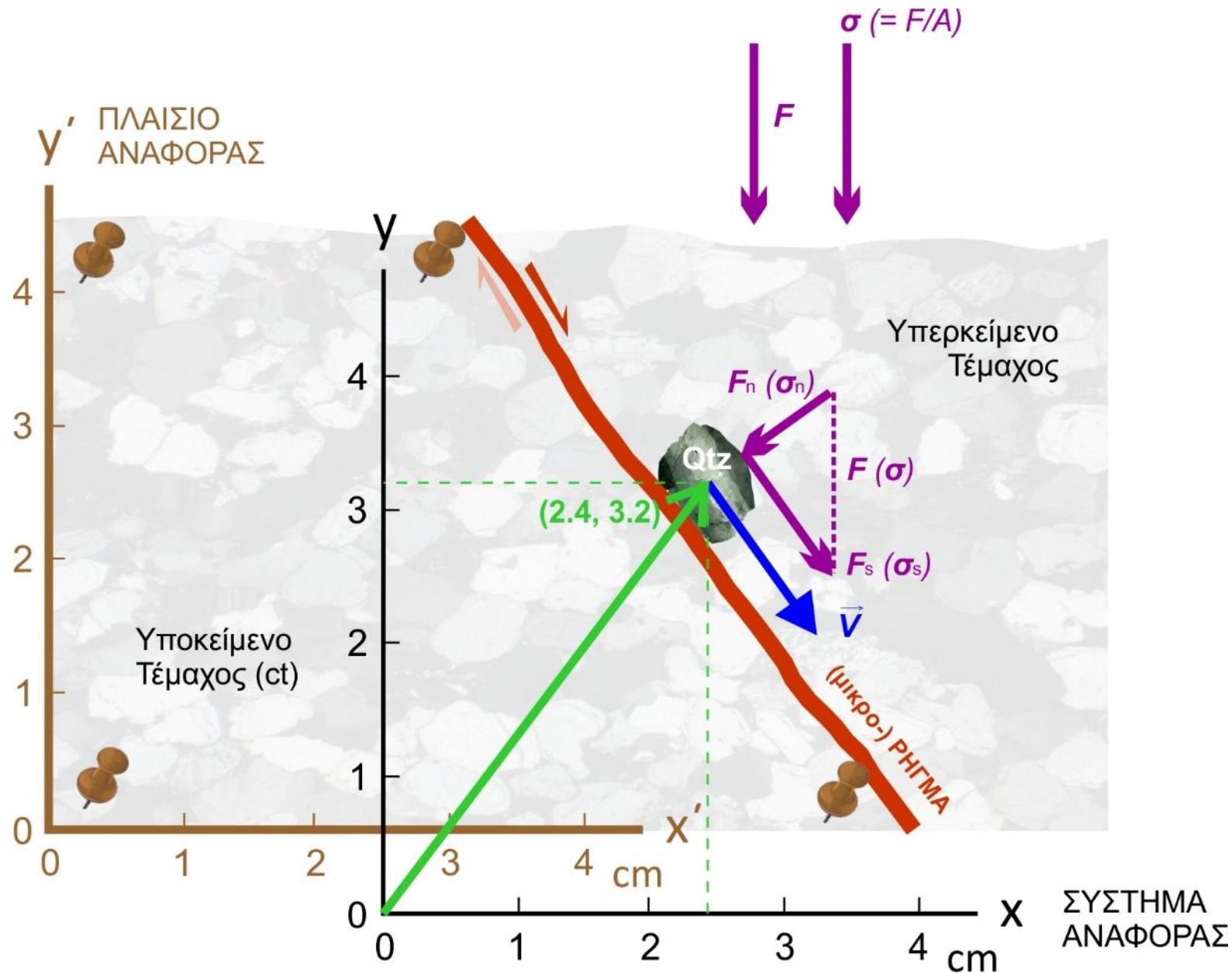
σ_2 vertical

Το βασικό αίτιο της παραμόρφωσης είναι οι **δυνάμεις** και οι **τάσεις** που ασκούνται στα πετρώματα, οι οποίες δεν είναι άμεσα ορατές, αλλά μπορούν να προκύψουν από τη μελέτη της παραμόρφωσης. Η **σχέση** τους όμως **δεν είναι απλή** και ακόμα και ο πιο ακριβής καθορισμός του εντατικού καθεστώτος δεν μπορεί να προβλέψει την παραμόρφωση (τεκτονική δομή) που θα προκύψει αν δεν ληφθούν υπόψη μια σειρά από άλλα στοιχεία, όπως οι **φυσικές ή μηχανικές ιδιότητες** του πετρώματος, η **πίεση** και η **θερμοκρασία** που επικρατούν κατά την παραμόρφωση, ο **χρόνος** κλπ.

Η σχέση τάσεων και παραμόρφωσης είναι ακόμα πιο πολύπλοκη στα πετρώματα αν ληφθεί υπόψη ότι αρκετές φορές αυτά έχουν υποστεί **πολλαπλές παραμορφωτικές φάσεις**, σε διαφορετικές συνθήκες και κάτω από **διαφορετικά εντατικά πεδία**.

Η γνώση του τοπικά επικρατούντος πεδίου τάσεων έχει αρκετές **πρακτικές εφαρμογές** όπως στην αξιολόγηση των εργασιών **διάνοιξης σηράγγων** και στην **διάνοιξη γεωτρήσεων** για πετρέλαιο ή νερό.

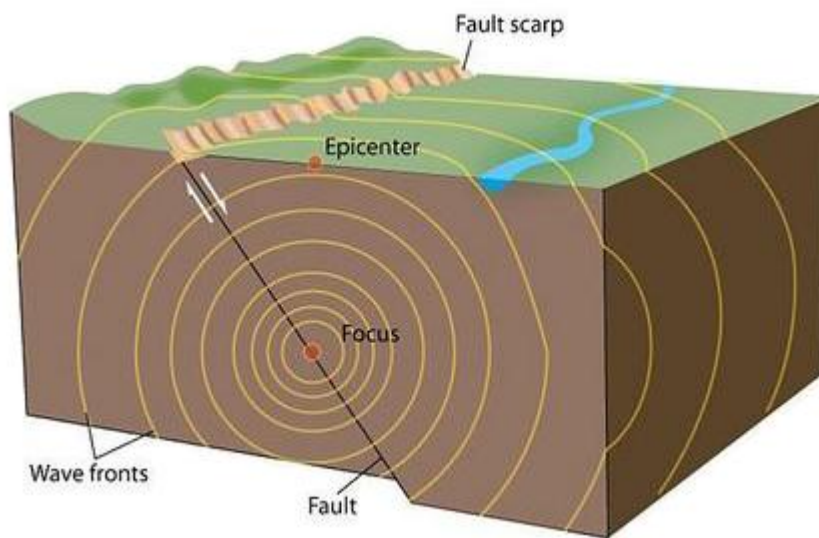
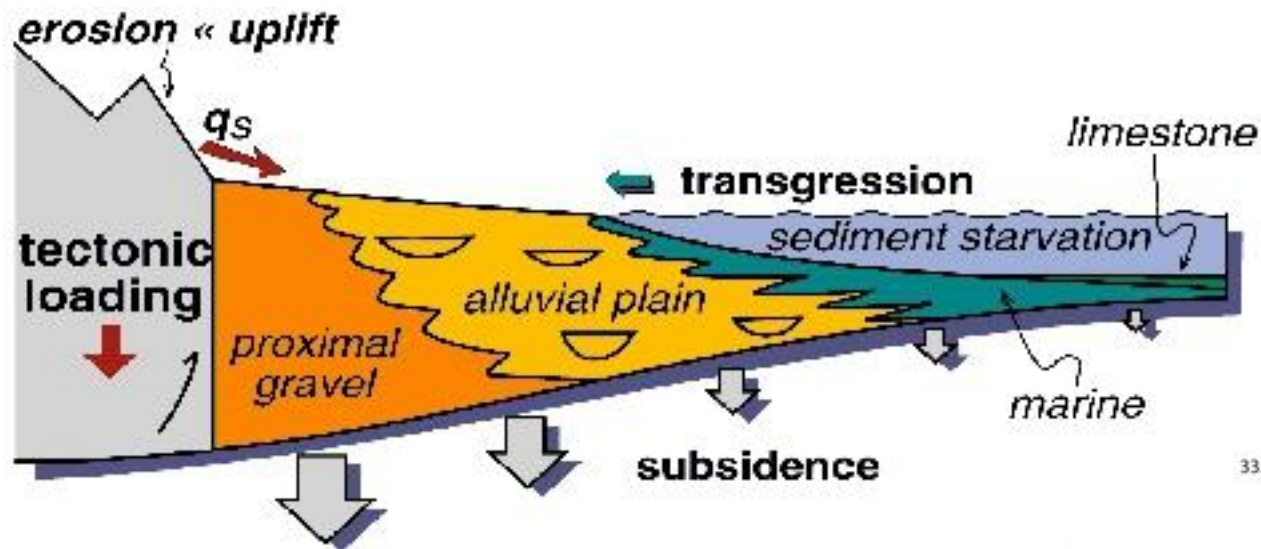
- Ορισμοί και βασικά μεγέθη
- Καθεστώς τάσης σε σημείο
- Μέση και αποκλίνουσα τάση
- Διάγραμμα και κύκλος του Mohr
- Καθεστώτα (τάσεων) αναφοράς
- Συνιστώσες καθεστώτων τάσεων
- Η θεωρία του Anderson για τη ρηγμάτωση
- Το κριτήριο θραύσης του Coulomb
- Κριτήρια Griffith και Von Mises



Μηχανική κατάσταση

- ΛΙΘΟΣΦΑΙΡΑ – ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ – ΒΡΑΧΩΔΕΣ ΣΩΜΑ – ΒΡΑΧΩΔΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑ
- ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ (για κάθε υλικό σημείο τη χρονική στιγμή t) →
 - Θέση
 - Ταχύτητα
 - Δύναμη
 - Τάση
- Πλαίσιο Αναφοράς & Σύστημα Συντεταγμένων
- ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ (για κάθε υλικό σημείο, μετά από χρονικό διάστημα π.χ. 10.000 έτη) →
 - Μετατόπιση
 - Παραμόρφωση
 - Μεταβολές Τάσεων

- Ορισμοί και βασικά μεγέθη
- Καθεστώς τάσης σε σημείο
- Μέση και αποκλίνουσα τάση
- Διάγραμμα και κύκλος του Mohr
- Καθεστώτα (τάσεων) αναφοράς
- Συνιστώσες καθεστώτων τάσεων
- Η θεωρία του Anderson για τη ρηγμάτωση
- Το κριτήριο θραύσης του Coulomb
- Κριτήρια Griffith και Von Mises

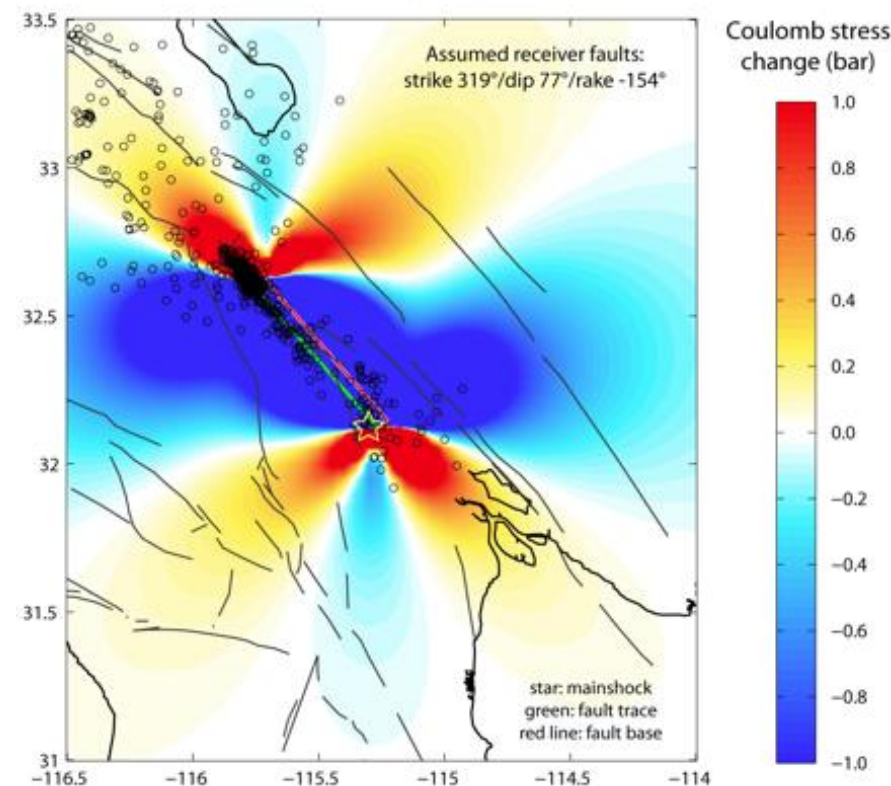


Απότομη μεταβολή της τάσης σε ένα επίπεδο → π.χ. ΣΕΙΣΜΟΣ

Αργή μεταβολή της τάσης → π.χ. ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΕΣΗ ή ΑΠΟΦΟΡΤΙΣΗ ΛΟΓΩ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

4 Apr 2010 Mw=7.2 Laguna Salada, Mexico, Earthquake
Preliminary Uniform-slip Coulomb model 1.0

Ross Stein (USGS), Shinji Toda (Kyoto Univ)

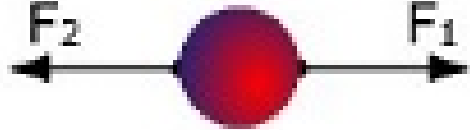


- Ορισμοί και βασικά μεγέθη
- Καθεστώς τάσης σε σημείο
- Μέση και αποκλίνουσα τάση
- Διάγραμμα και κύκλος του Mohr
- Καθεστώτα (τάσεων) αναφοράς
- Συνιστώσες καθεστώτων τάσεων
- Η θεωρία του Anderson για τη ρηγμάτωση
- Το κριτήριο θραύσης του Coulomb
- Κριτήρια Griffith και Von Mises

Δύναμη - Force

1ος ΝΟΜΟΣ του ΝΕΥΤΩΝΑ

Ένα σώμα παραμένει **σταθερό**, ή **κινείται με σταθερή ταχύτητα** (ευθύγραμμο και ομαλά), όταν η **συνισταμένη των δυνάμεων** που ασκούνται επάνω του ισούται με το **0**.

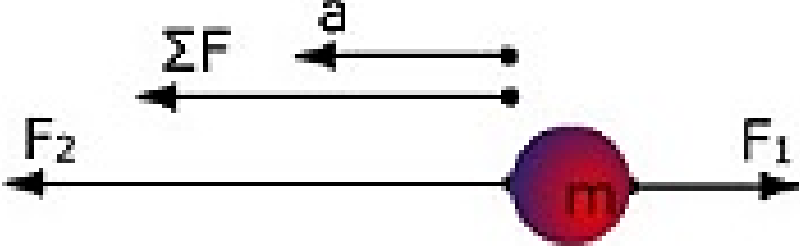


- Διανυσματικό μέγεθος (μέγεθος και φορά)
- Μονάδα μέτρησης το Newton: $1 \text{ N} = 1 \text{ Kg} \cdot \text{m} / \text{s}^2$
- Οι ΔΥΝΑΜΕΙΣ μεταβάλουν το **σχήμα**, τη **θέση**, ή την **ταχύτητα** των αντικειμένων (σωμάτων) → Άρα είναι το αίτιο της ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

2ος ΝΟΜΟΣ του ΝΕΥΤΩΝΑ

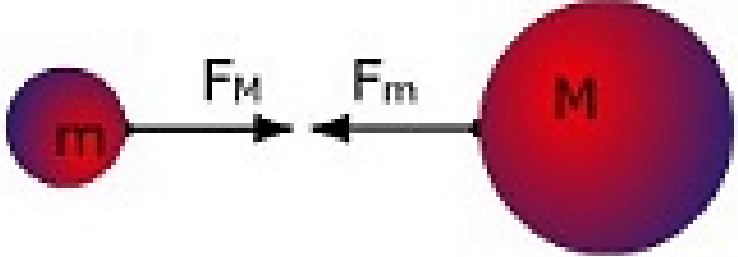
Η μεταβολή της ταχύτητας (**επιτάχυνση**) ενός σώματος, εξαρτάται από το **μέγεθος** και τη **φορά** της **συνισταμένης δύναμης** που ασκείται σε αυτό (και είναι $\neq 0$).

$\Sigma F = ma$



3ος ΝΟΜΟΣ του ΝΕΥΤΩΝΑ

Για κάθε **δύναμη**, που ασκεί ένα σώμα σε ένα άλλο, υπάρχει πάντα μια **ίση και αντίθετη δύναμη** (που ασκεί το άλλο σε αυτό).



- Ορισμοί και βασικά μεγέθη
- Καθεστώς τάσης σε σημείο
- Μέση και αποκλίνουσα τάση
- Διάγραμμα και κύκλος του Mohr
- Καθεστώτα (τάσεων) αναφοράς
- Συνιστώσες καθεστώτων τάσεων
- Η θεωρία του Anderson για τη ρηγμάτωση
- Το κριτήριο θραύσης του Coulomb
- Κριτήρια Griffith και Von Mises

BODY FORCES (ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΜΑΖΑΣ ή ΣΩΜΑΤΟΣ)

- Δρουν από **απόσταση**.
- Επηρεάζουν **όλο** τον **όγκο** (τη μάζα) του πετρώματος (εσωτερικά και εξωτερικά).
- Εξαρτώνται από την **ποσότητα** της **ύλης** πάνω στην οποία ασκούνται.

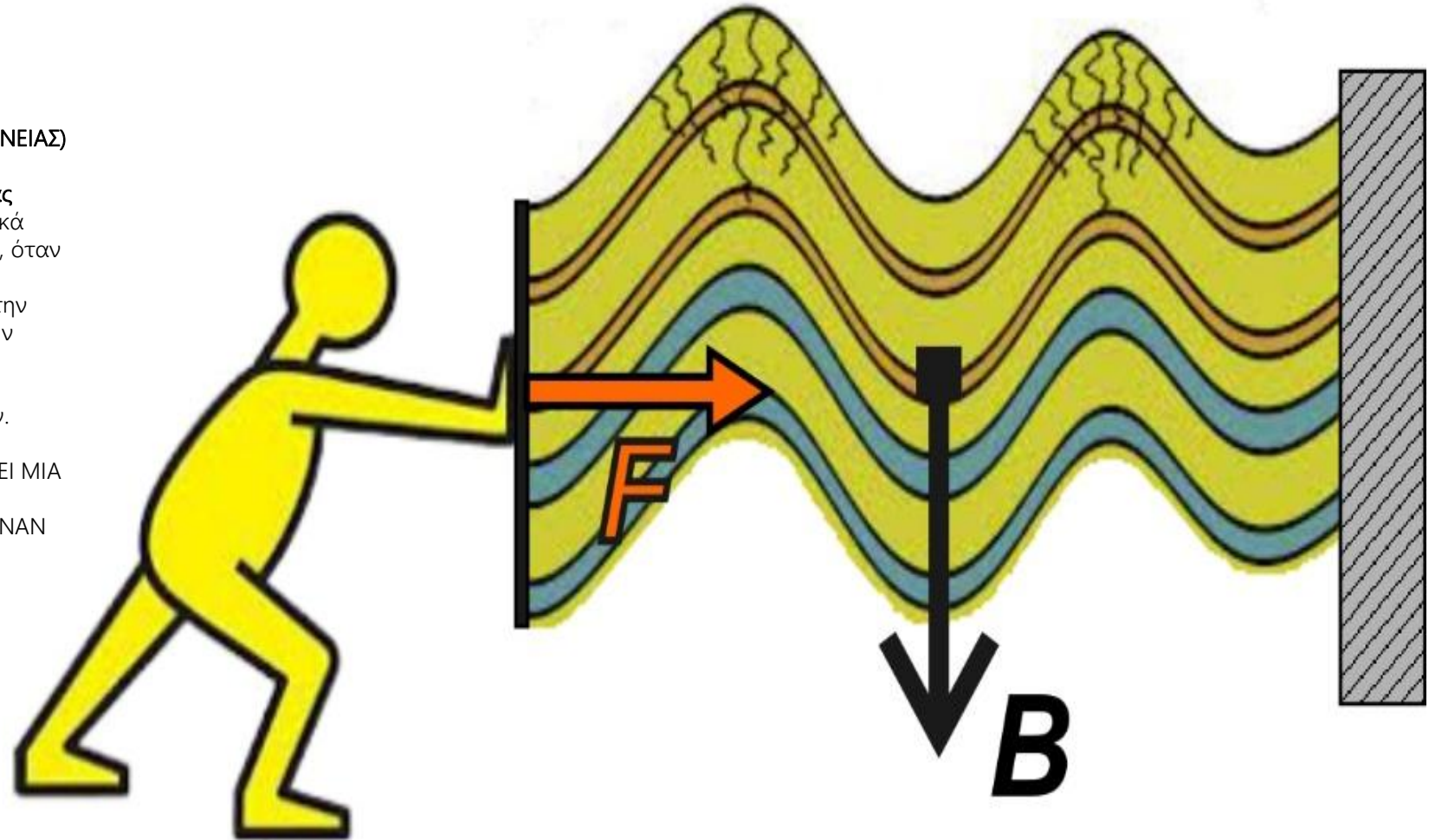
π.χ. ΒΑΡΥΤΗΤΑ
(ή π.χ. ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ)

SURFACE FORCES (ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ)

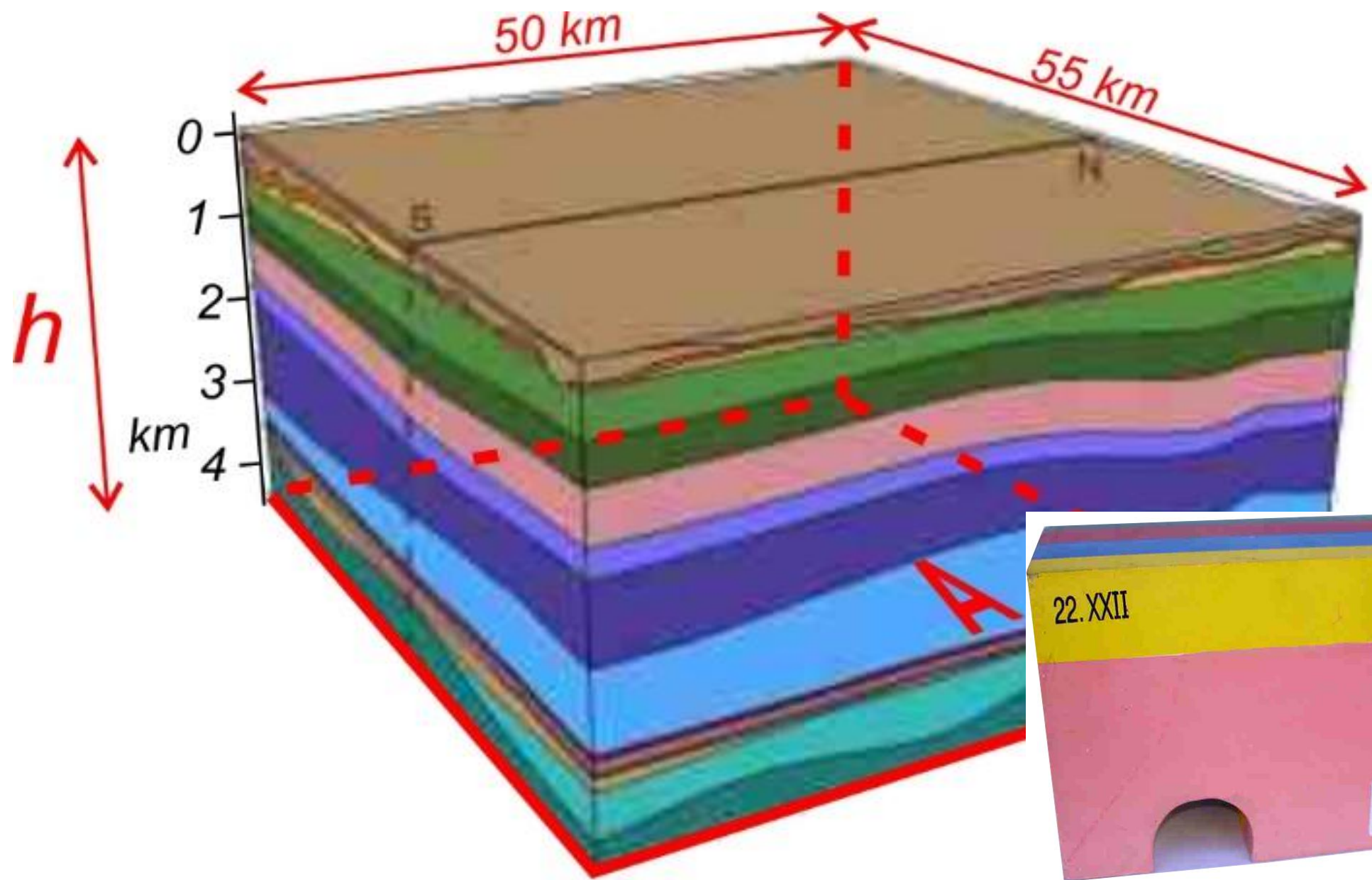
- Δρουν κατά μήκος της **επιφάνειας επαφής** ανάμεσα σε δύο γεωλογικά σώματα (ή βραχώδη συστήματα), όταν το ένα ωθεί (ή έλκει) το άλλο.
- Το μέγεθός τους εξαρτάται από την **έκταση** της **επιφάνειας** πάνω στην οποία δρουν.
- Είναι **πολύ σημαντικές** κατά την **παραμόρφωση** των πετρωμάτων.

π.χ. ΜΙΑ ΛΙΘΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΠΛΑΚΑ ΩΘΕΙ ΜΙΑ ΑΛΛΗ ΛΙΘΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΠΛΑΚΑ ή
π.χ. ΕΝΑΣ ΚΟΚΚΟΣ ΟΡΥΚΤΟΥ ΩΘΕΙ ΕΝΑΝ ΑΛΛΟ ΚΟΚΚΟ

Κατηγορίες (κλάσεις) δυνάμεων



- Ορισμοί και βασικά μεγέθη
- Καθεστώς τάσης σε σημείο
- Μέση και αποκλίνουσα τάση
- Διάγραμμα και κύκλος του Mohr
- Καθετώτα (τάσεων) αναφοράς
- Συνιστώσες καθεστώτων τάσεων
- Η θεωρία του Anderson για τη ρηγμάτωση
- Το κριτήριο θραύσης του Coulomb
- Κριτήρια Griffith και Von Mises



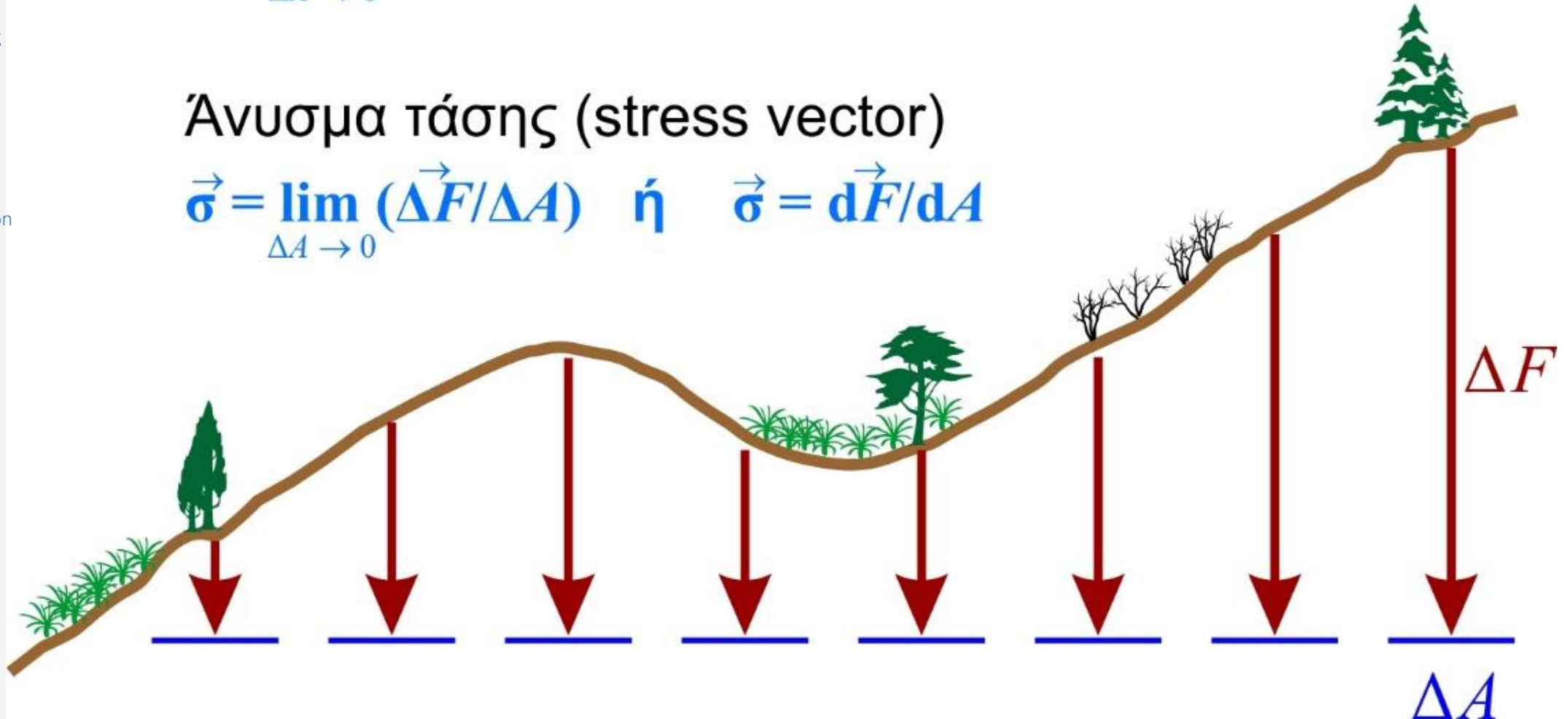
- Ορισμοί και βασικά μεγέθη
- Καθεστώς τάσης σε σημείο
- Μέση και αποκλίνουσα τάση
- Διάγραμμα και κύκλος του Mohr
- Καθεστώτα (τάσεων) αναφοράς
- Συνιστώσες καθεστώτων τάσεων
- Η θεωρία του Anderson για τη ρηγμάτωση
- Το κριτήριο θραύσης του Coulomb
- Κριτήρια Griffith και Von Mises

Τάση (stress)

$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} (\Delta F / \Delta A) \quad \text{ή} \quad \sigma = dF/dA$$

Άνυσμα τάσης (stress vector)

$$\vec{\sigma} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} (\Delta \vec{F} / \Delta A) \quad \text{ή} \quad \vec{\sigma} = d\vec{F}/dA$$



- Ορισμοί και βασικά μεγέθη
- Καθεστώς τάσης σε σημείο
- Μέση και αποκλίνουσα τάση
- Διάγραμμα και κύκλος του Mohr
- Καθεστώτα (τάσεων) αναφοράς
- Συνιστώσες καθεστώτων τάσεων
- Η θεωρία του Anderson για τη ρηγμάτωση
- Το κριτήριο θραύσης του Coulomb
- Κριτήρια Griffith και Von Mises

Τάση (Stress) VS Πίεση (Pressure)

Χρήση του όρου ΠΙΕΣΗ (pressure – P)

- Χρησιμοποιείται όταν το μέσο χαρακτηρίζεται από καθόλου ή **αμελητέα διατμητική αντοχή**.
- Εφαρμογή σε **υγρά** και **αέρια**.

Π.χ.

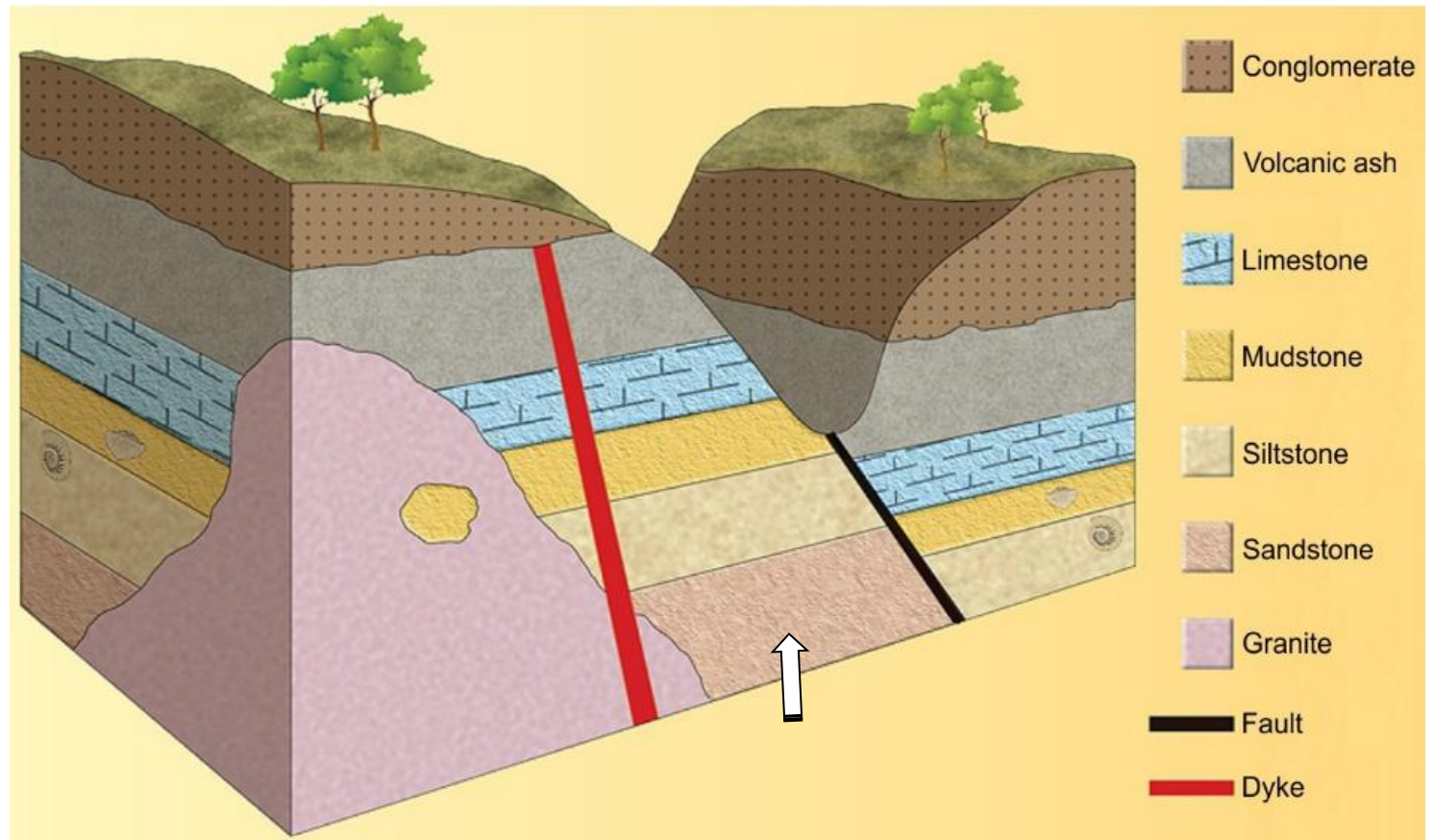
- ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΗ ΠΙΕΣΗ
- ΠΙΕΣΗ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ ΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

Χρήση του όρου ΤΑΣΗ (stress – σ)

- Χρησιμοποιείται όταν το μέσο **παρουσιάζει διατμητική αντοχή**.
- Εφαρμογή σε **όλα τα πετρώματα** και τα **περισσότερα ιζήματα**.

Π.χ.

- οι **ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΗΡΙΕΣ ΤΑΣΕΙΣ** που δρουν σε ένα **ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΣΩΜΑ**
- το **ΚΑΘΕΣΤΩΣ ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ** κάτω από το οποίο βρίσκονται τα **ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ**



↑ Για το θαμμένο στρώμα του πορώδους ψαμμίτη (sandstone) της εικόνας μπορούμε να μιλάμε και για **ΠΙΕΣΗ** και για **ΤΑΣΗ**, γιατί χαρακτηρίζεται από μια συγκεκριμένη **ΠΙΕΣΗ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ ΤΩΝ ΠΟΡΩΝ** και βρίσκεται κάτω από την επίδραση ενός συγκεκριμένου **ΠΕΔΙΟΥ ΤΑΣΕΩΝ**.

- Ορισμοί και βασικά μεγέθη
- Καθεστώς τάσης σε σημείο
- Μέση και αποκλίνουσα τάση
- Διάγραμμα και κύκλος του Mohr
- Καθεστώτα (τάσεων) αναφοράς
- Συνιστώσες καθεστώτων τάσεων
- Η θεωρία του Anderson για τη ρηγμάτωση
- Το κριτήριο θραύσης του Coulomb
- Κριτήρια Griffith και Von Mises

Μονάδες μέτρησης

Μονάδα μέτρησης το **Pascal (Pa)**:

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N} / \text{m}^2 = 1 \text{ kg} / (\text{m} \cdot \text{s}^2)$$

Άλλες μονάδες μέτρησης:

$$1 \text{ dyn} = 1 \text{ gr} \cdot \text{m} / \text{sec}^2 = 10^{-5} \text{ N}$$

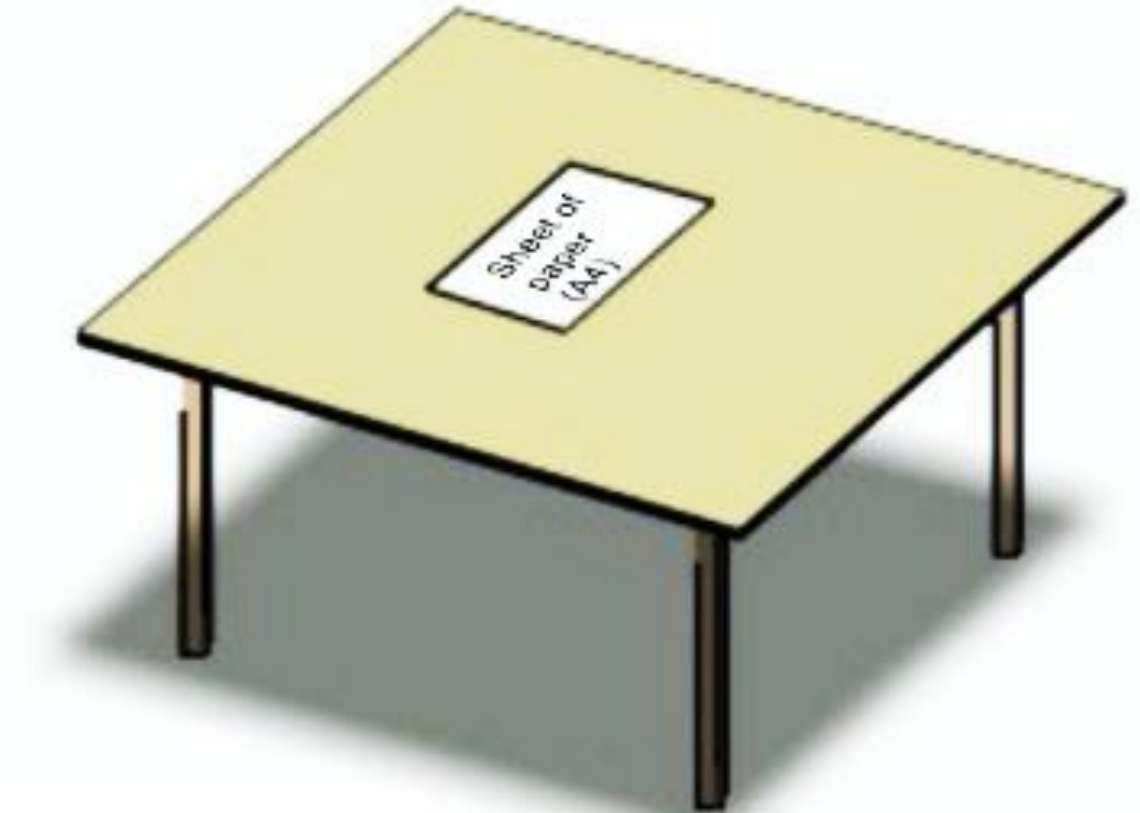
$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ atm} = 101.325 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ psi} = 1 \text{ lb} / \text{in}^2 = 6.894,76 \text{ Pa}$$

→
Το Pascal αποτελεί μια πολύ μικρή ποσότητα. Αντιστοιχεί χονδρικά στην τάση που ασκείται σε ένα τραπέζι από ένα συνηθισμένο φύλλο χαρτιού.

*Για τις τάσεις στον στερεό φλοιό της Γης, που είναι πολύ μεγαλύτερες, χρησιμοποιούμε τα **MegaPascals** ($1 \text{ Mpa} = 10^6 \text{ Pa}$) ή τα **GigaPascalas** ($1 \text{ Gra} = 10^9 \text{ Pa}$).*



One Pascal

- Ορισμοί και βασικά μεγέθη
- Καθεστώς τάσης σε σημείο
- Μέση και αποκλίνουσα τάση
- Διάγραμμα και κύκλος του Mohr
- Καθεστώτα (τάσεων) αναφοράς
- Συνιστώσες καθεστώτων τάσεων
- Η θεωρία του Anderson για τη ρηγμάτωση
- Το κριτήριο θραύσης του Coulomb
- Κριτήρια Griffith και Von Mises

- SURFACE FORCES (ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ)
- BODY FORCES (ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΜΑΖΑΣ ή ΣΩΜΑΤΟΣ)

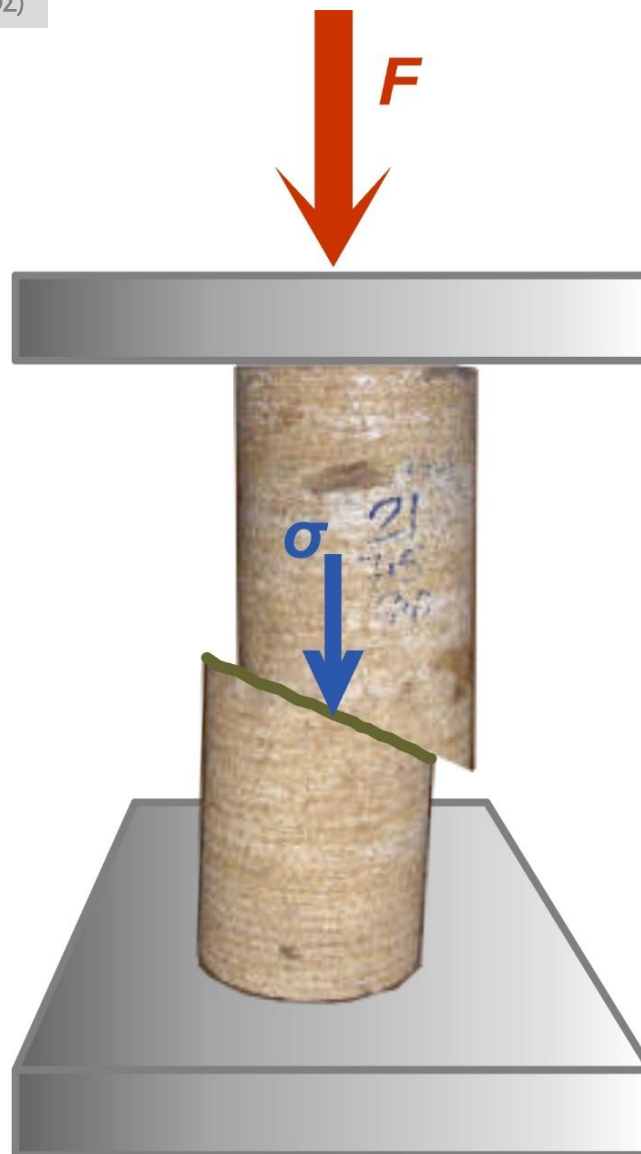
- STRESS ON A SURFACE (ΤΑΣΗ ΣΕ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ)

Είναι διανυσματικό μέγεθος και εκφράζεται με ένα **απλό άνυσμα**.

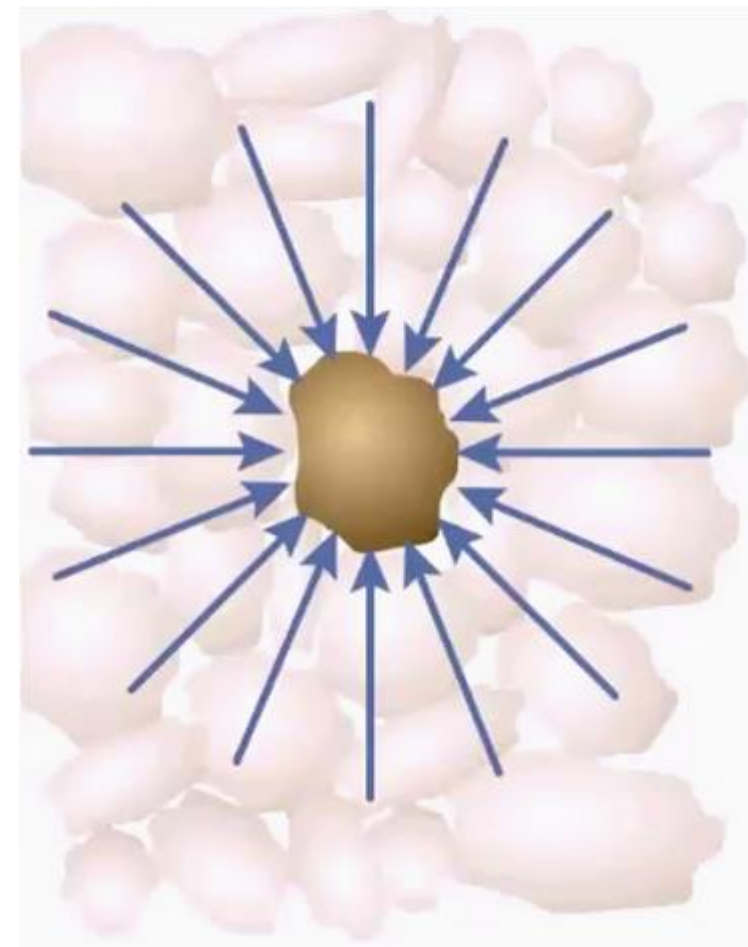
- STATE OF STRESS AT A POINT (ΚΑΘΕΣΤΩΣ ΤΑΣΕΩΝ ΣΕ ΣΗΜΕΙΟ)

Περιλαμβάνει τα άνυσματα τάσης που αντιστοιχούν σε όλα τα επίπεδα που διέρχονται από ένα σημείο και εκφράζεται με ένα **τανυστή δεύτερης τάξης**.

Οι Γεωλόγοι που ειδικεύονται στην Τεχνική Γεωλογία και τη Βραχομηχανική αναφέρονται στην "τάση σε επιφάνεια" με τον όρο "traction" ("ελκυστής" ?) και χρησιμοποιούν τον όρο "stress" με την έννοια του "καθεστώτος τάσεων" ("state of stress").



Τάση σε επιφάνεια και τάση σε σημείο

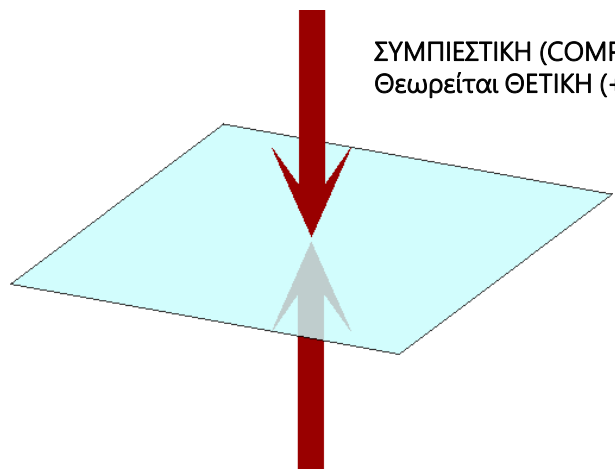


- Ορισμοί και βασικά μεγέθη
- Καθεστώς τάσης σε σημείο
- Μέση και αποκλίνουσα τάση
- Διάγραμμα και κύκλος του Mohr
- Καθεστώτα (τάσεων) αναφοράς
- Συνιστώσες καθεστώτων τάσεων
- Η θεωρία του Anderson για τη ρηγμάτωση
- Το κριτήριο θραύσης του Coulomb
- Κριτήρια Griffith και Von Mises

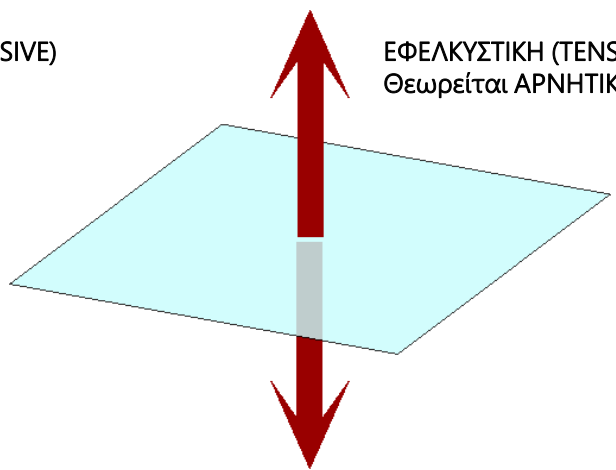
Η **τάση** (ή η **δύναμη**) που δρα κάθετα σε μια επιφάνεια καλείται **ΟΡΘΗ** και αυτή που δρα παράλληλα με την επιφάνεια **ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ**, και μπορεί να είναι:

Πρόσημα και συμβάσεις

ΟΡΘΕΣ ΤΑΣΕΙΣ

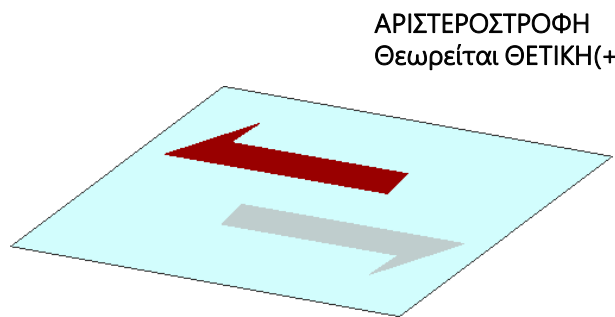


ΣΥΜΠΙΕΣΤΙΚΗ (COMPRESSIVE)
Θεωρείται **ΘΕΤΙΚΗ (+)**

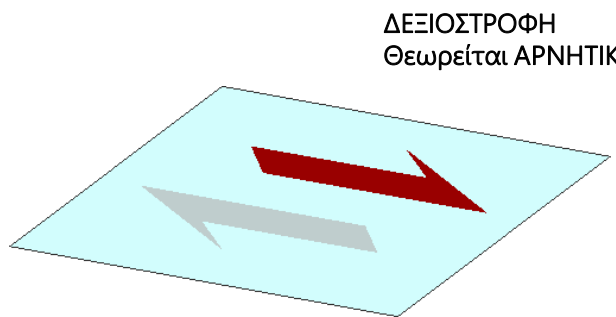


ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ (TENSILE)
Θεωρείται **ΑΡΝΗΤΙΚΗ (-)**

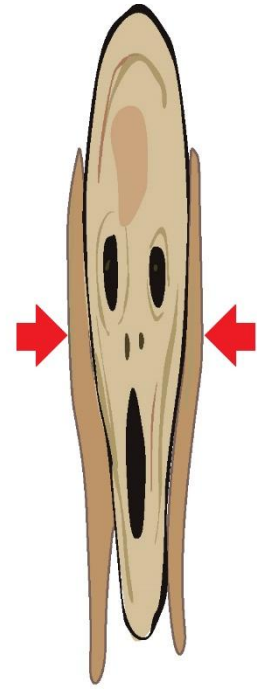
ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ



ΑΡΙΣΤΕΡΟΣΤΡΟΦΗ
Θεωρείται **ΘΕΤΙΚΗ(+)**



ΔΕΞΙΟΣΤΡΟΦΗ
Θεωρείται **ΑΡΝΗΤΙΚΗ (-)**



Positive stress



Negative stress

Όροι Δυναμικής (Τάσεις - Stress)

COMPRESSION (ΣΥΜΠΙΕΣΗ)

(TENSION) ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ

Όροι Παραμόρφωσης (Τροπή - Strain)

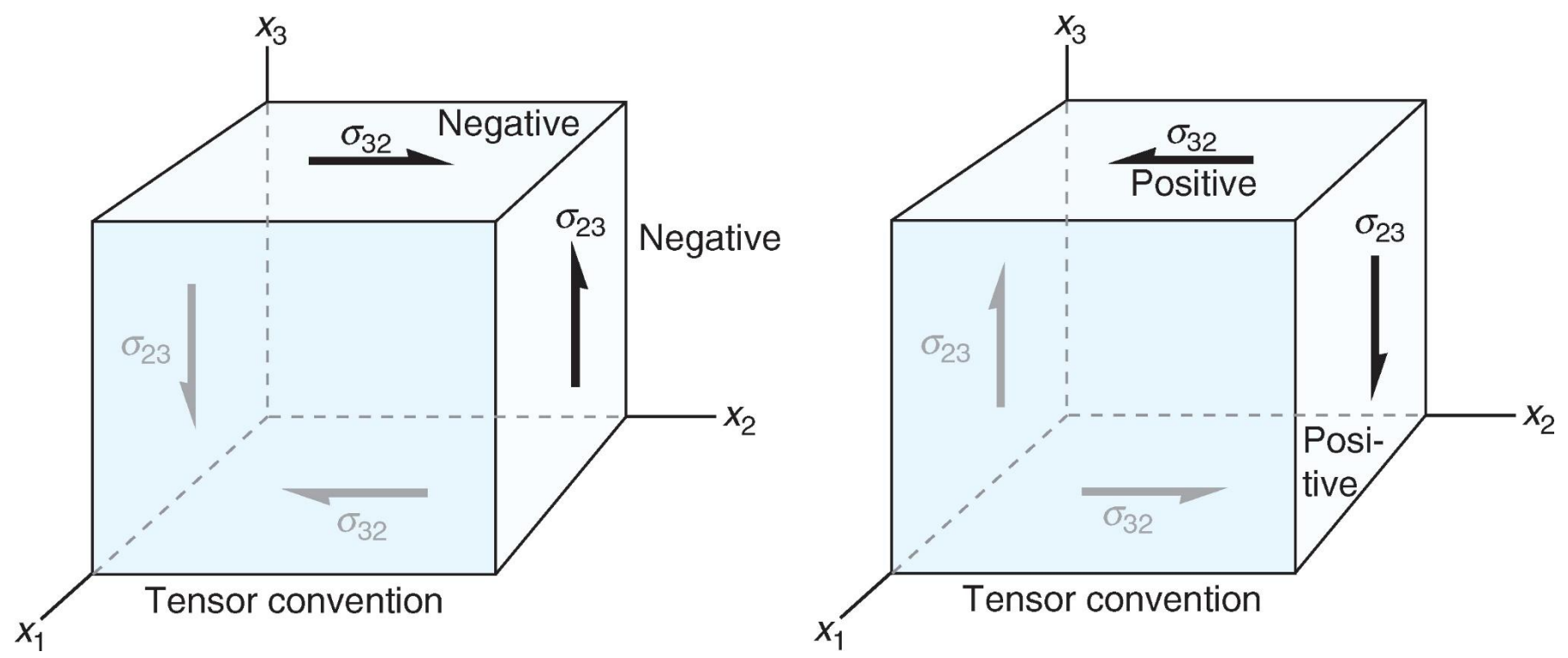
CONTRACTION (ΒΡΑΧΥΝΣΗ)

EXTENSION (ΕΚΤΑΣΗ)

Η σύμβαση αυτή για τις διατμητικές τάσεις ισχύει για τον κύκλο του Mohr, γιατί (→ βλπ. επόμενη διαφάνεια)

- Ορισμοί και βασικά μεγέθη
- Καθεστώς τάσης σε σημείο
- Μέση και αποκλίνουσα τάση
- Διάγραμμα και κύκλος του Mohr
- Καθεστώτα (τάσεων) αναφοράς
- Συνιστώσες καθεστώτων τάσεων
- Η θεωρία του Anderson για τη ρηγμάτωση
- Το κριτήριο θραύσης του Coulomb
- Κριτήρια Griffith και Von Mises

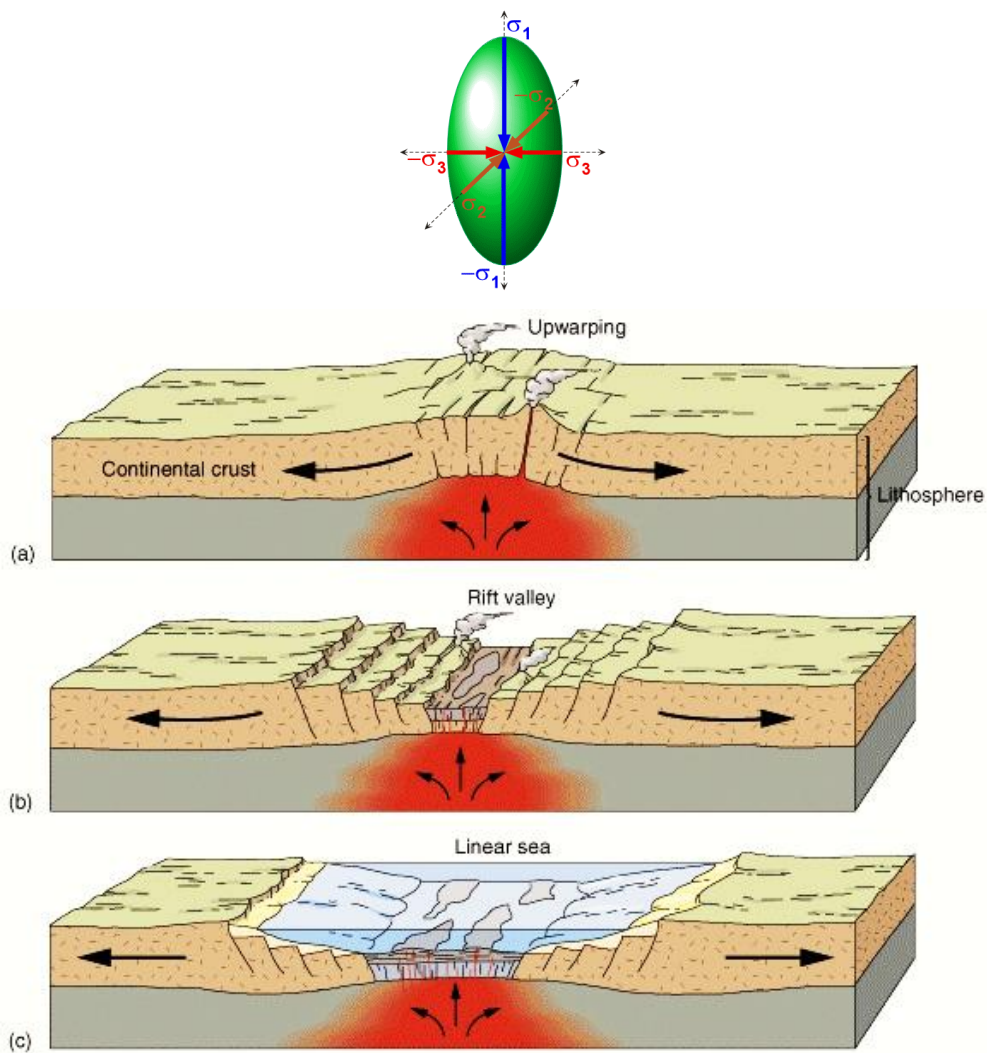
..... για τον ταυνοστή που περιγράφει το καθεστώς τάσεων σε σημείο, η συνθήκη είναι διαφορετική, όπως παρακάτω:



Για κάθε διατμητικό ζεύγος τάσεων, όταν η τάση που βρίσκεται στην **πίσω** (κρυμμένη) **πλευρά** του κύβου έχει **φορά** (δείχνει) προς την **θετική κατεύθυνση** του άξονα του συστήματος αναφοράς με τον οποίο είναι παράλληλη, τότε θα θεωρείται **θετική (+)** και στην αντίθετη περίπτωση αρνητική (-).

- Ορισμοί και βασικά μεγέθη
- Καθεστώτ τάσης σε σημείο
- Μέση και αποκλίνουσα τάση
- Διάγραμμα και κύκλος του Mohr
- Καθεστώτα (τάσεων) αναφοράς
- Συνιστώσες καθεστώτων τάσεων
- Η θεωρία του Anderson για τη ρηγμάτωση
- Το κριτήριο θραύσης του Coulomb
- Κριτήρια Griffith και Von Mises

Επισημαίνεται ότι η σύμβαση αυτή ισχύει για την **ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΓΕΩΛΟΓΙΑ** και αυτό γιατί ο **στερεός φλοιός** της Γης κυριαρχείται από **συμπιεστικές τάσεις**. Ακόμα και στις περιοχές που έχουμε έκταση (π.χ. στις περιοχές που έχουμε **ενεργό rifting**) όλοι οι άξονες των τάσεων του εντατικού πεδίου είναι συμπιεστικοί.

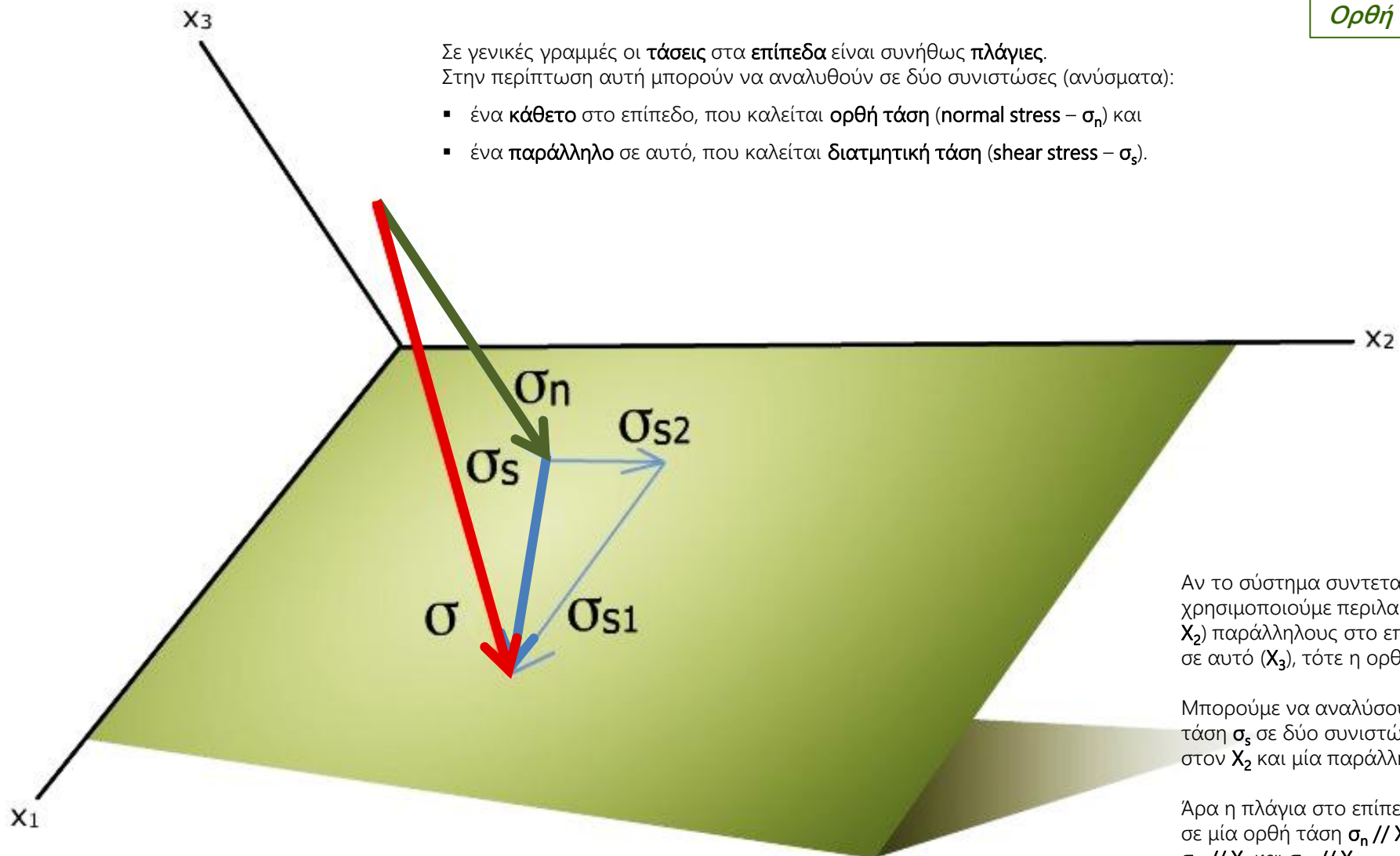


Αντίθετα, στην **ΤΕΧΝΙΚΗ ΓΕΩΛΟΓΙΑ** και την επιστήμη της **ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**, ο εφελκυσμός θεωρείται θετικός (+) και η συμπίεση αρνητική (-). Αυτό γιατί τα υλικά παρουσιάζουν συνήθως πολύ **μικρότερη αντοχή** στον **εφελκυσμό**, σε σχέση με την συμπίεση και άρα αυτός είναι πιο σημαντικός στις κατασκευές (γέφυρες, κτήρια κλπ.)



- Ορισμοί και βασικά μεγέθη
- Καθεστώς τάσης σε σημείο
- Μέση και αποκλίνουσα τάση
- Διάγραμμα και κύκλος του Mohr
- Καθεστώτα (τάσεων) αναφοράς
- Συνιστώσες καθεστώτων τάσεων
- Η θεωρία του Anderson για τη ρηγμάτωση
- Το κριτήριο θραύσης του Coulomb
- Κριτήρια Griffith και Von Mises

Ορθή και διατμητική τάση



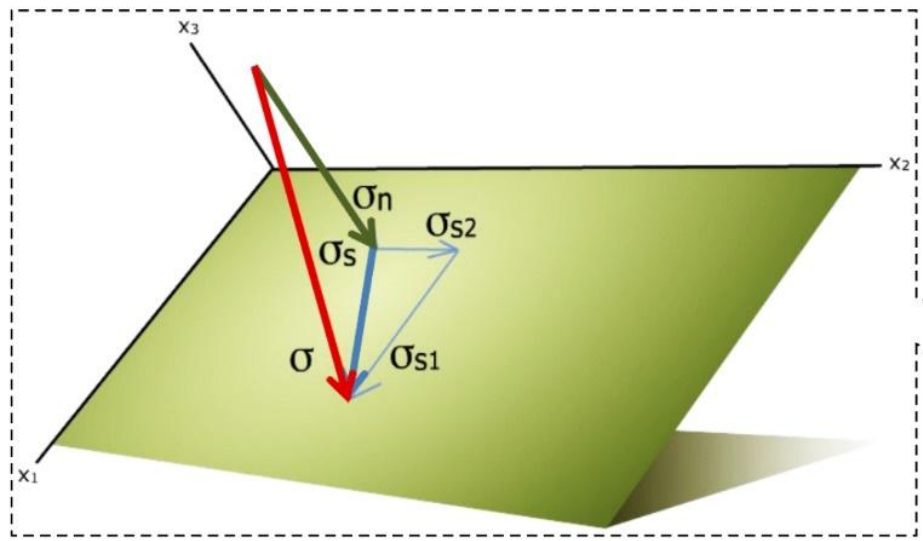
Αν το σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιούμε περιλαμβάνει δύο άξονες (X_1 , X_2) παράλληλους στο επίπεδο και έναν κάθετο σε αυτό (X_3), τότε η ορθή συνιστώσα $\sigma_n // X_3$.

Μπορούμε να αναλύσουμε την διατμητική τάση σ_s σε δύο συνιστώσες, μία παράλληλη στον X_2 και μία παράλληλη στον X_1 .

Άρα η πλάγια στο επίπεδο τάση σ αναλύεται σε μία ορθή τάση $\sigma_n // X_3$ και δύο διατμητικές, $\sigma_{s1} // X_1$ και $\sigma_{s2} // X_2$.

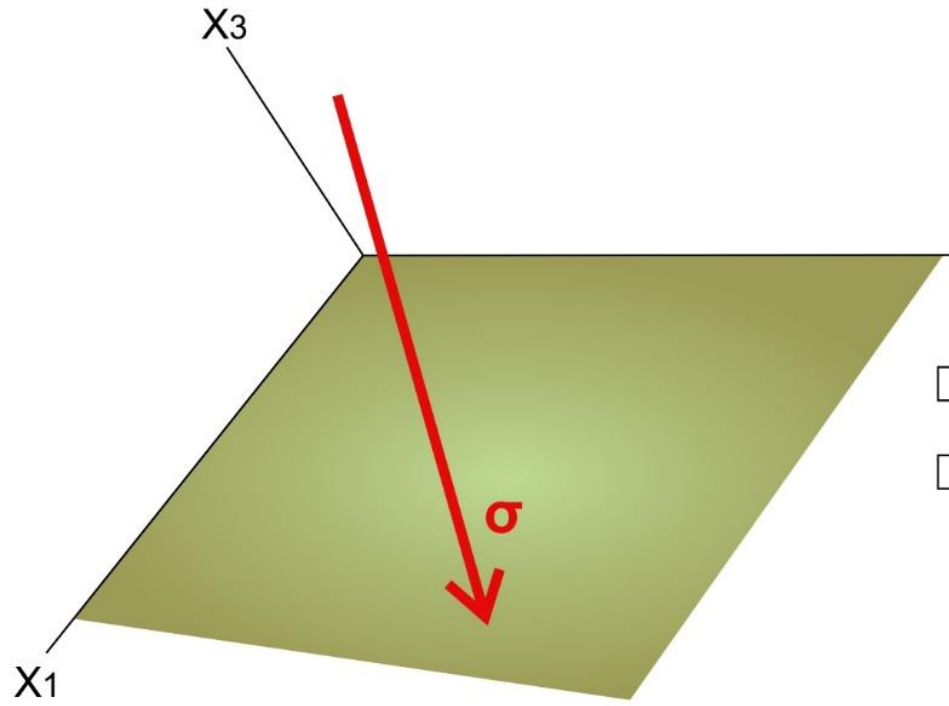
- Ορισμοί και βασικά μεγέθη
- Καθεστώς τάσης σε σημείο
- Μέση και αποκλίνουσα τάση
- Διάγραμμα και κύκλος του Mohr
- Καθεστώτα (τάσεων) αναφοράς
- Συνιστώσες καθεστώτων τάσεων
- Η θεωρία του Anderson για τη ρηγμάτωση
- Το κριτήριο θραύσης του Coulomb
- Κριτήρια Griffith και Von Mises

Ανάλυση και συμβολισμοί τάσεων



$$\vec{\sigma} = \vec{\sigma}_{33} + \vec{\sigma}_{31} + \vec{\sigma}_{32}$$

$$\sigma = \sqrt{(\sigma_{33})^2 + (\sigma_{31})^2 + (\sigma_{32})^2}$$



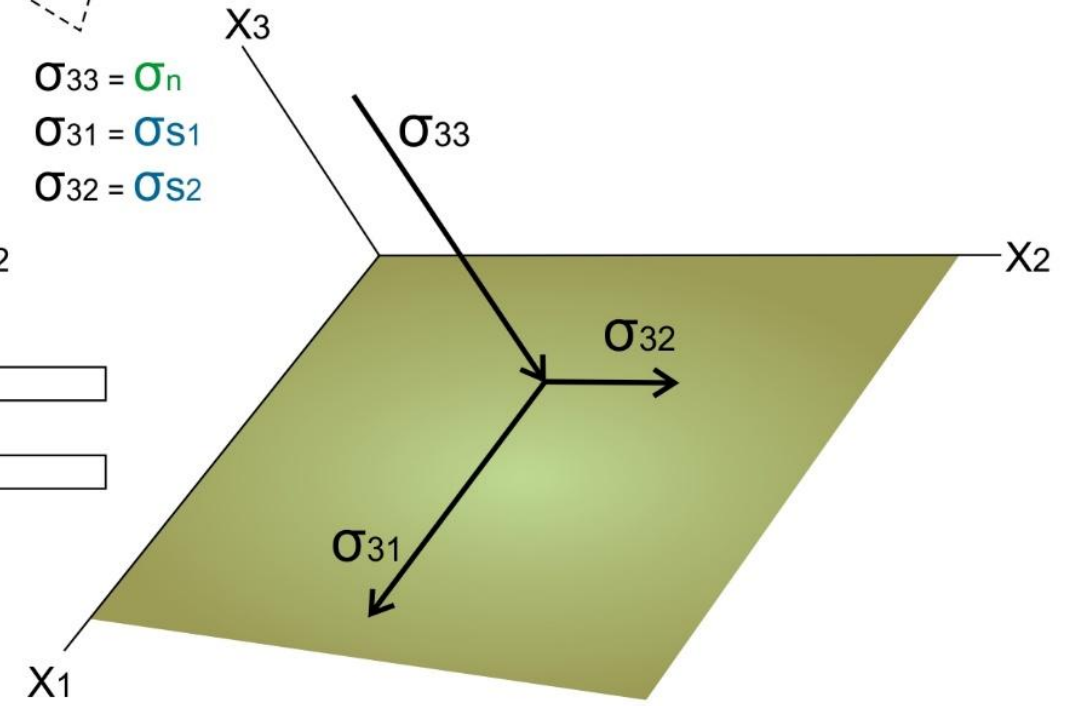
$$\sigma_{33} = \sigma_n$$

$$\sigma_{31} = \sigma_{s1}$$

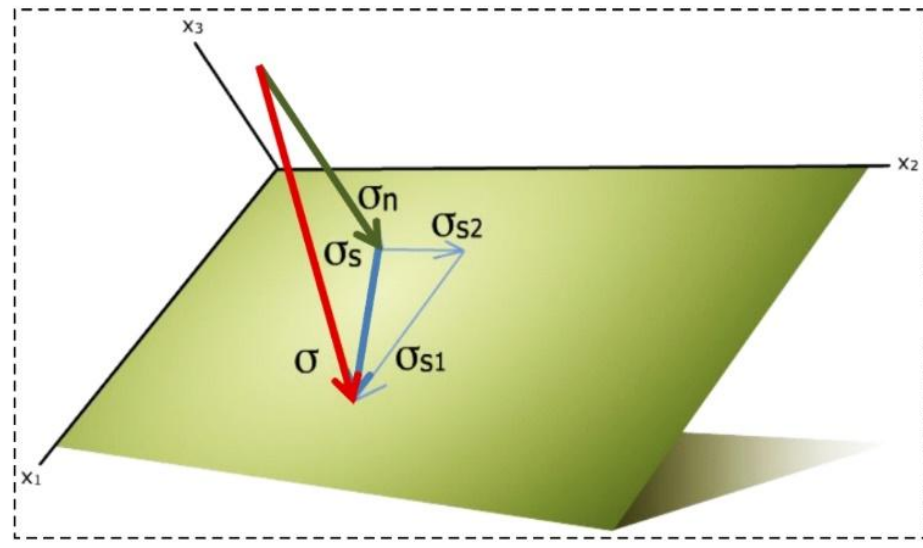
$$\sigma_{32} = \sigma_{s2}$$

=

=



- Ορισμοί και βασικά μεγέθη
- Καθεστώς τάσης σε σημείο
- Μέση και αποκλίνουσα τάση
- Διάγραμμα και κύκλος του Mohr
- Καθεστώτα (τάσεων) αναφοράς
- Συνιστώσες καθεστώτων τάσεων
- Η θεωρία του Anderson για τη ρηγμάτωση
- Το κριτήριο θραύσης του Coulomb
- Κριτήρια Griffith και Von Mises



Αλλαγή συμβολισμού αξόνων συστήματος συντεταγμένων: $X_1, X_2, X_3 \rightarrow x, y, z$

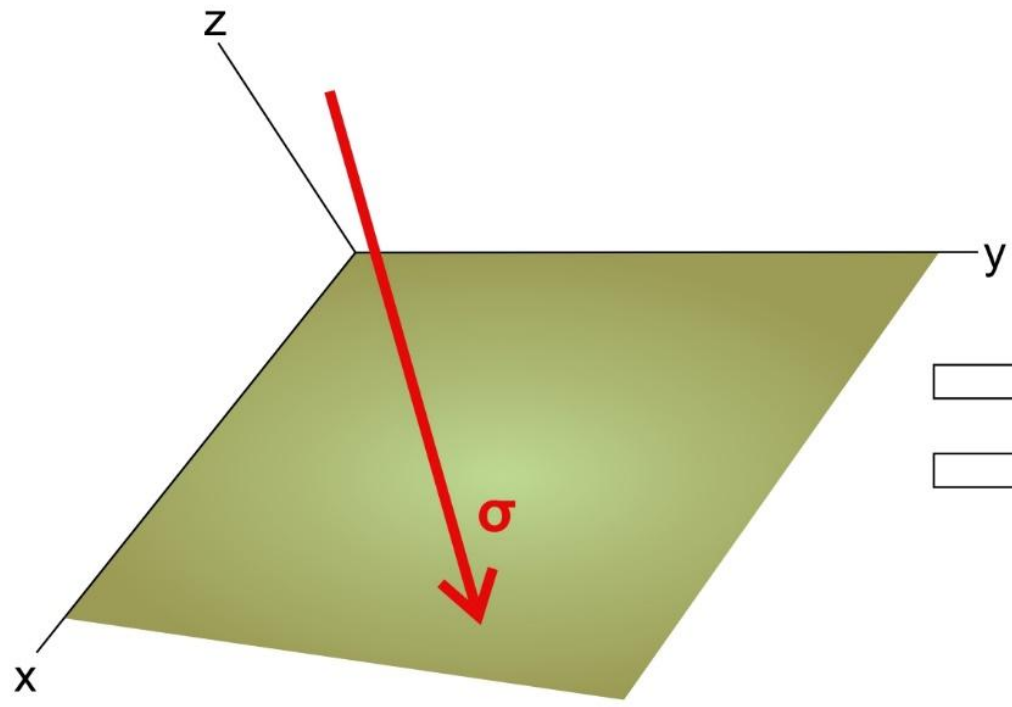
$$\vec{\sigma} = \vec{\sigma}_{zz} + \vec{\sigma}_{zx} + \vec{\sigma}_{zy}$$

$$\sigma = \sqrt{(\sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zx})^2 + (\sigma_{zy})^2}$$

$$\sigma_{zz} = \sigma_n$$

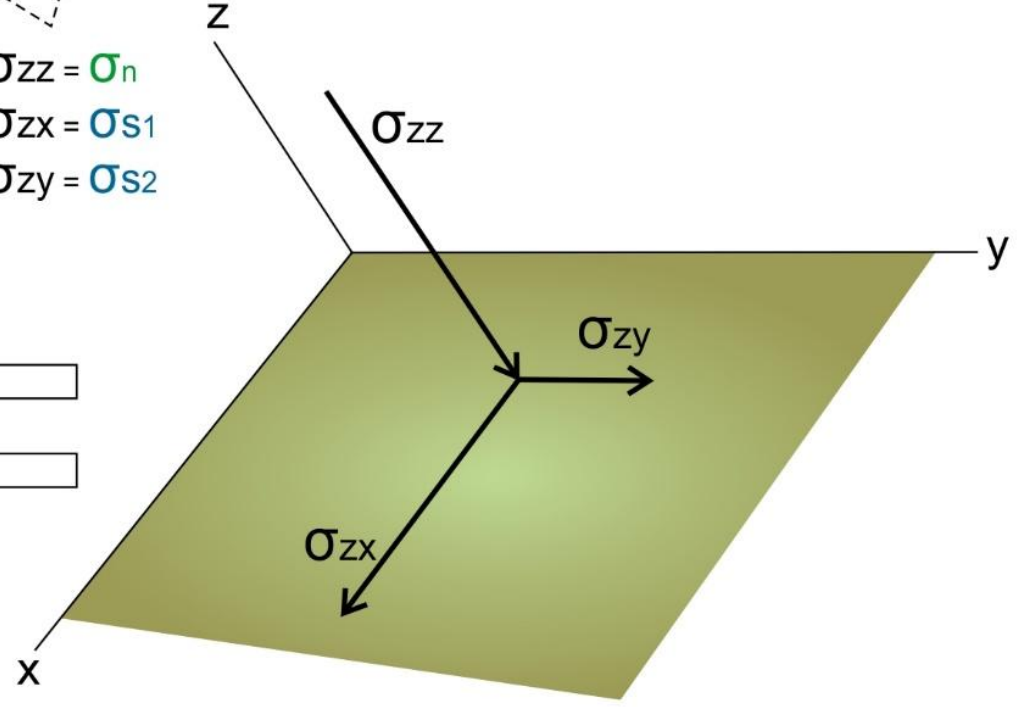
$$\sigma_{zx} = \sigma_{s1}$$

$$\sigma_{zy} = \sigma_{s2}$$

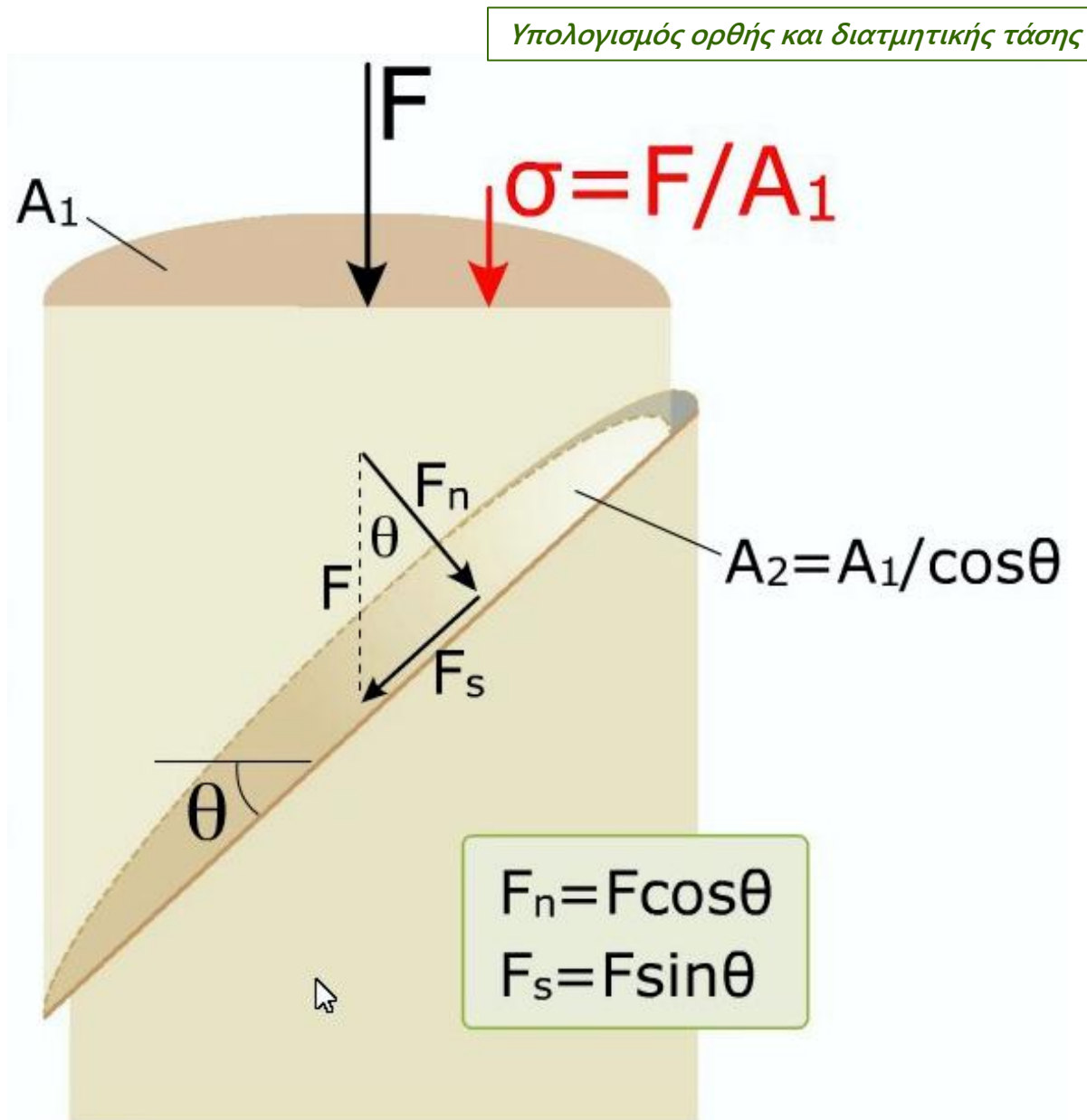


=

=



- Ορισμοί και βασικά μεγέθη
- Καθεστώς τάσης σε σημείο
- Μέση και αποκλίνουσα τάση
- Διάγραμμα και κύκλος του Mohr
- Καθεστώτα (τάσεων) αναφοράς
- Συνιστώσες καθεστώτων τάσεων
- Η θεωρία του Anderson για τη ρηγμάτωση
- Το κριτήριο θραύσης του Coulomb
- Κριτήρια Griffith και Von Mises



The normal stress component (σ_n)

$$\begin{aligned} \sigma_n &= F_n/A_2 \\ &\Downarrow \\ \sigma_n &= F\cos\theta/A_2 \\ &\Downarrow \\ \sigma_n &= F\cos^2\theta/A_1 \\ &\Downarrow \\ \sigma_n &= \sigma\cos^2\theta \end{aligned}$$

The shear stress component (σ_s)

$$\begin{aligned} \sigma_s &= F_s/A_2 \\ &\Downarrow \\ \sigma_s &= F\sin\theta/(A_1/\cos\theta) \\ &\Downarrow \\ \sigma_s &= F\sin\theta\cos\theta/A_1 \\ &\Downarrow \\ \sigma_s &= \sigma\sin\theta\cos\theta \end{aligned}$$

Using the double-angle formula yields:

$$\begin{aligned} \sin 2\theta &= 2\sin\theta\cos\theta \\ &\Downarrow \\ \sin\theta\cos\theta &= \sin 2\theta/2 \end{aligned}$$

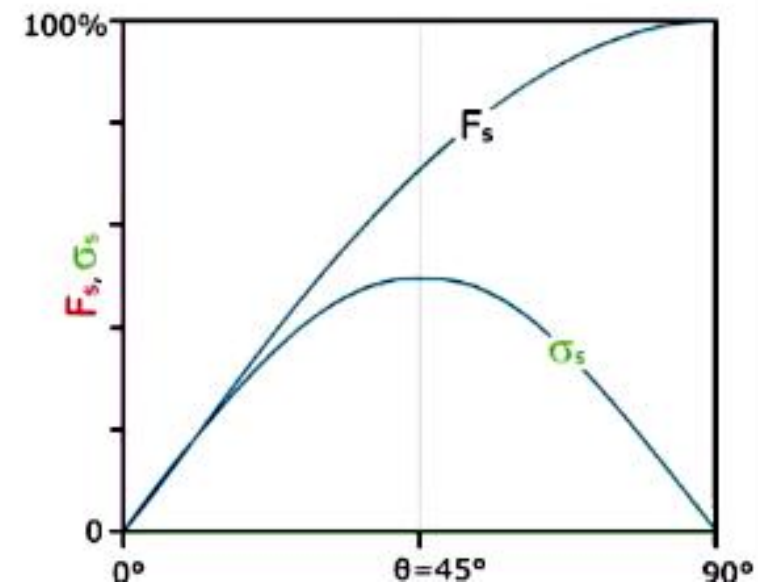
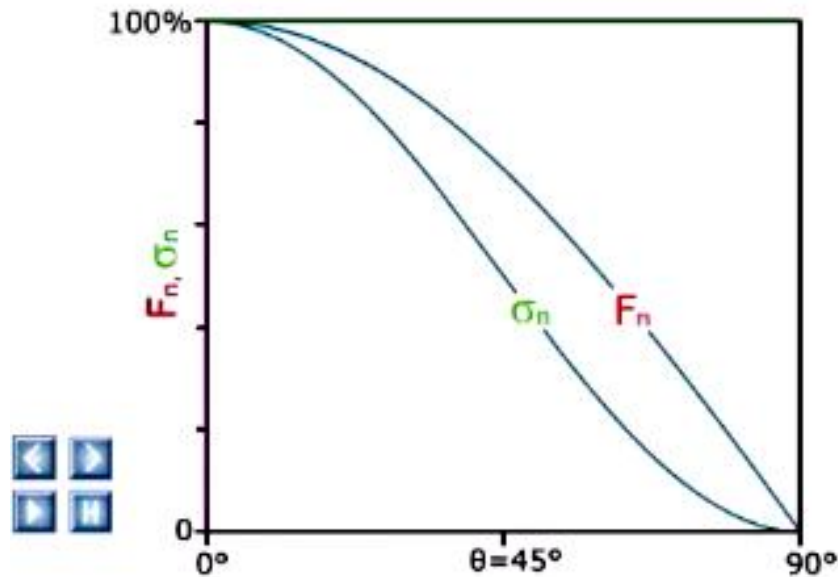
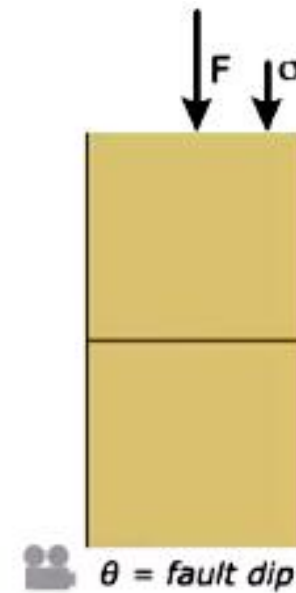
Thus:

$\sigma_s = (\sigma \sin 2\theta)/2$

- Ορισμοί και βασικά μεγέθη
- Καθεστώς τάσης σε σημείο
- Μέση και αποκλίνουσα τάση
- Διάγραμμα και κύκλος του Mohr
- Καθεστώτα (τάσεων) αναφοράς
- Συνιστώσες καθεστώτων τάσεων
- Η θεωρία του Anderson για τη ρηγμάτωση
- Το κριτήριο θραύσης του Coulomb
- Κριτήρια Griffith και Von Mises

Μεταβολή των F_n, σ_n και F_s, σ_s που δρουν π.χ. σε ένα ρήγμα που η κλίση του (γωνία θ) μεταβάλλεται από 0° μέχρι 90° .

- $F_n, \sigma_n \text{ max (100\% F ή } \sigma)$ όταν $\theta=0$
- $F_n, \sigma_n = 0$ όταν $\theta= 90^\circ$
- $F_s, \sigma_s \text{ max (45\% F ή } \sigma)$ όταν $\theta= 45^\circ$
- $F_s, \sigma_s = 0$ όταν $\theta= 90^\circ$ ή $\theta= 0^\circ$

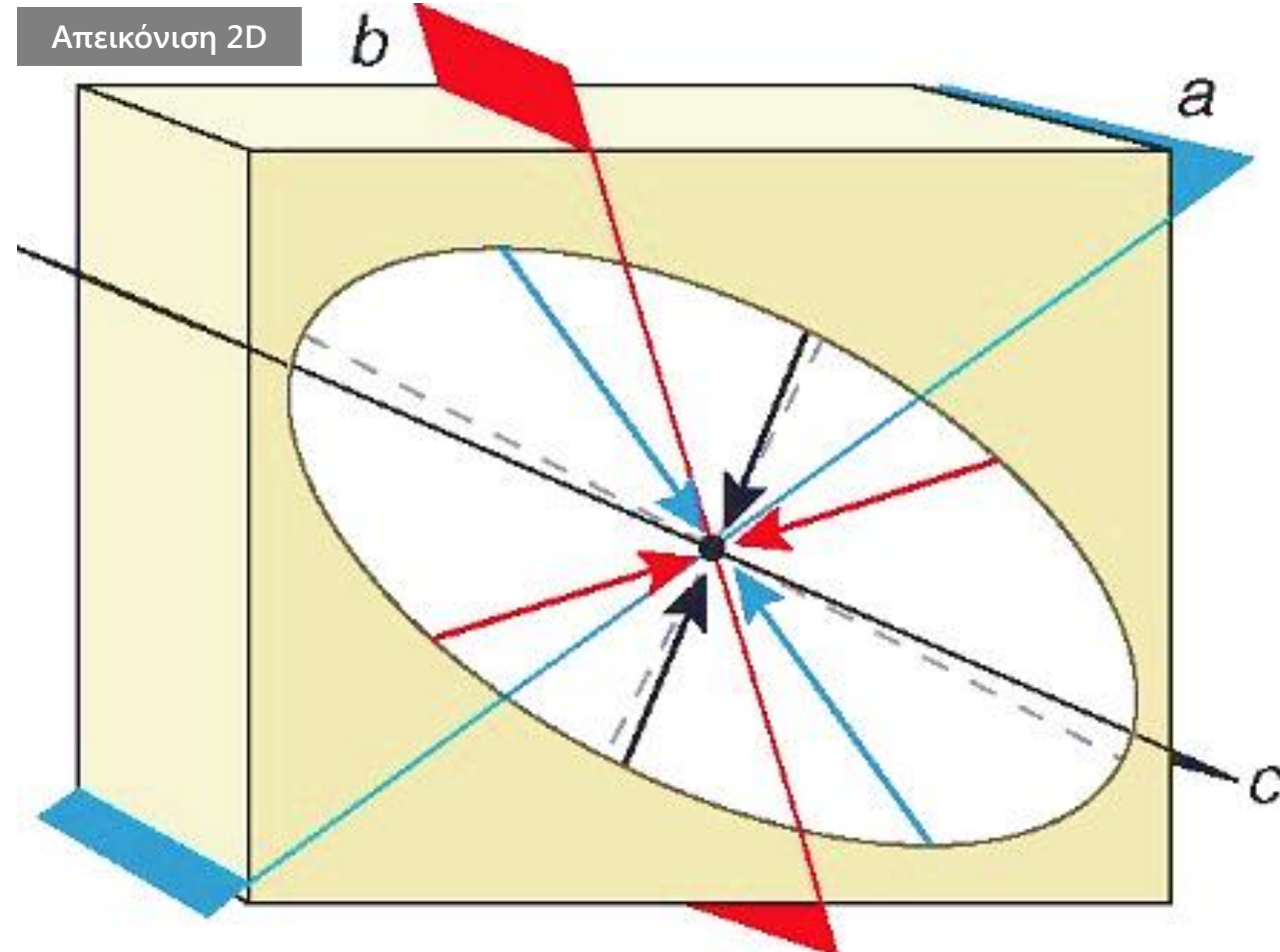
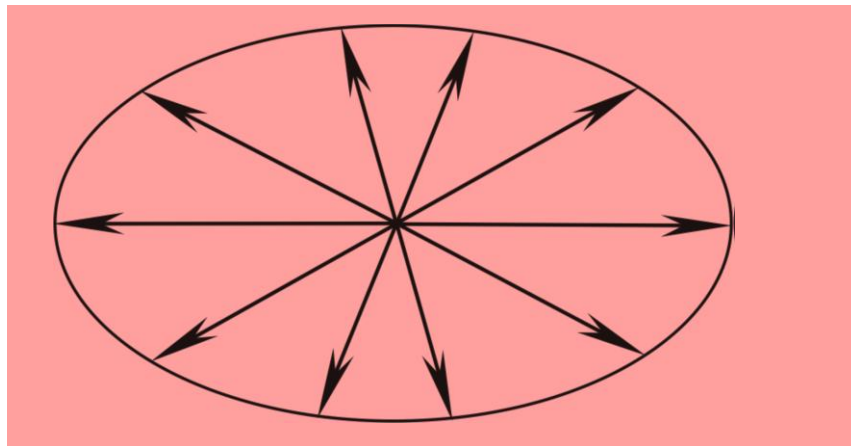
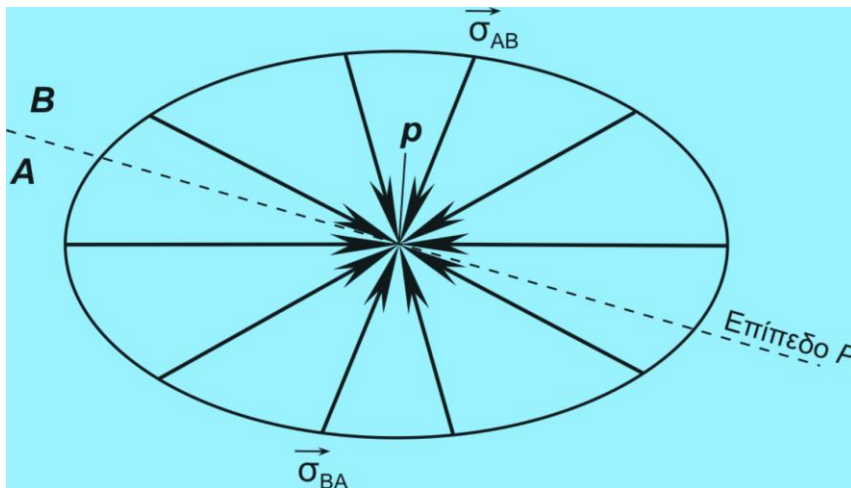


- Ορισμοί και βασικά μεγέθη
- Καθεστώς τάσης σε σημείο
- Μέση και αποκλίνουσα τάση
- Διάγραμμα και κύκλος του Mohr
- Καθεστώτα (τάσεων) αναφοράς
- Συνιστώσες καθεστώτων τάσεων
- Η θεωρία του Anderson για τη ρηγμάτωση
- Το κριτήριο θραύσης του Coulomb
- Κριτήρια Griffith και Von Mises

- Από ένα σημείο διέρχονται άπειρα επίπεδα.
- Σε καθένα από αυτά αντιστοιχεί ένα ζευγάρι αντίθετων τάσεων (ανύσματα).
- Ή όλες συμπιεστικές ή όλες εφελκυστικές.
- Το μέγεθος και ο προσανατολισμός για κάθε ζευγάρι τάσεων εξαρτάται από τον προσανατολισμό του επιπέδου.

- Συνήθως πλάγιες στο επίπεδο, εκτός από αυτές που αντιστοιχούν στα επίπεδα των κυρίων τάσεων, που είναι κάθετες σε αυτά (βλπ. στα επόμενα).
- Η επιφάνεια που περιβάλλει όλα αυτά τα ανύσματα αντιστοιχεί στο ελλειψοειδές τάσεων (έλλειψη στις δύο διαστάσεις).

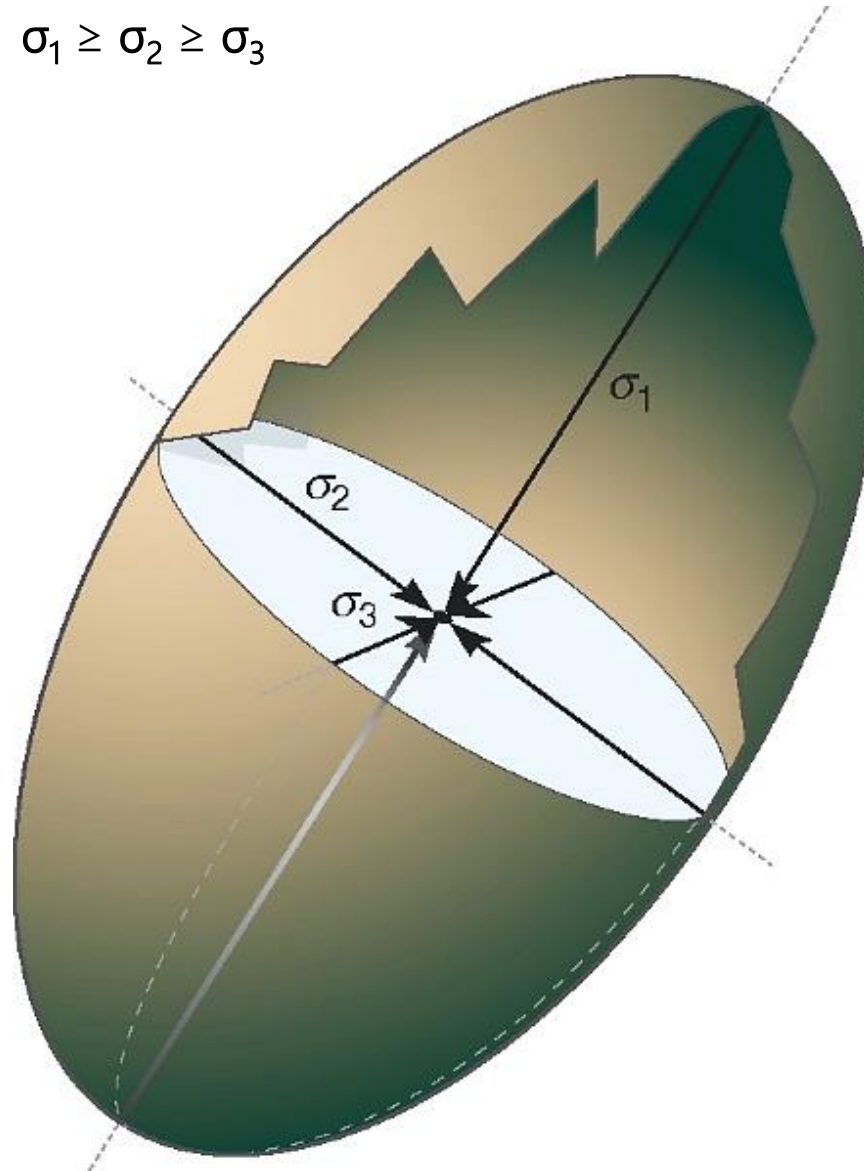
Ελλειψοειδές τάσεων (stress ellipsoid)



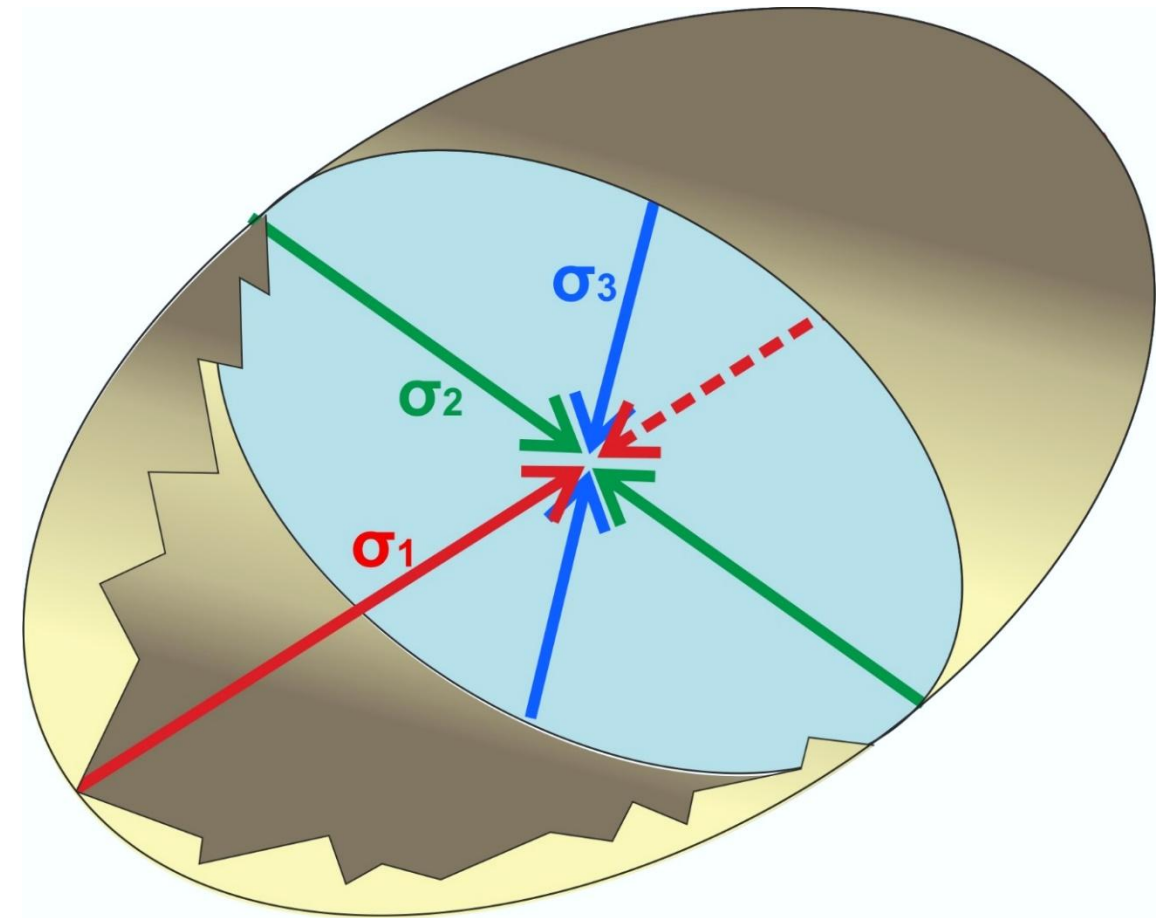
- Ορισμοί και βασικά μεγέθη
- Καθεστώς τάσης σε σημείο
- Μέση και αποκλίνουσα τάση
- Διάγραμμα και κύκλος του Mohr
- Καθεστώτα (τάσεων) αναφοράς
- Συνιστώσες καθεστώτων τάσεων
- Η θεωρία του Anderson για τη ρηγμάτωση
- Το κριτήριο θραύσης του Coulomb
- Κριτήρια Griffith και Von Mises

Ελλειψοειδές τάσεων = 3D αναπαράσταση καθεστώτος τάσεων σε σημείο.

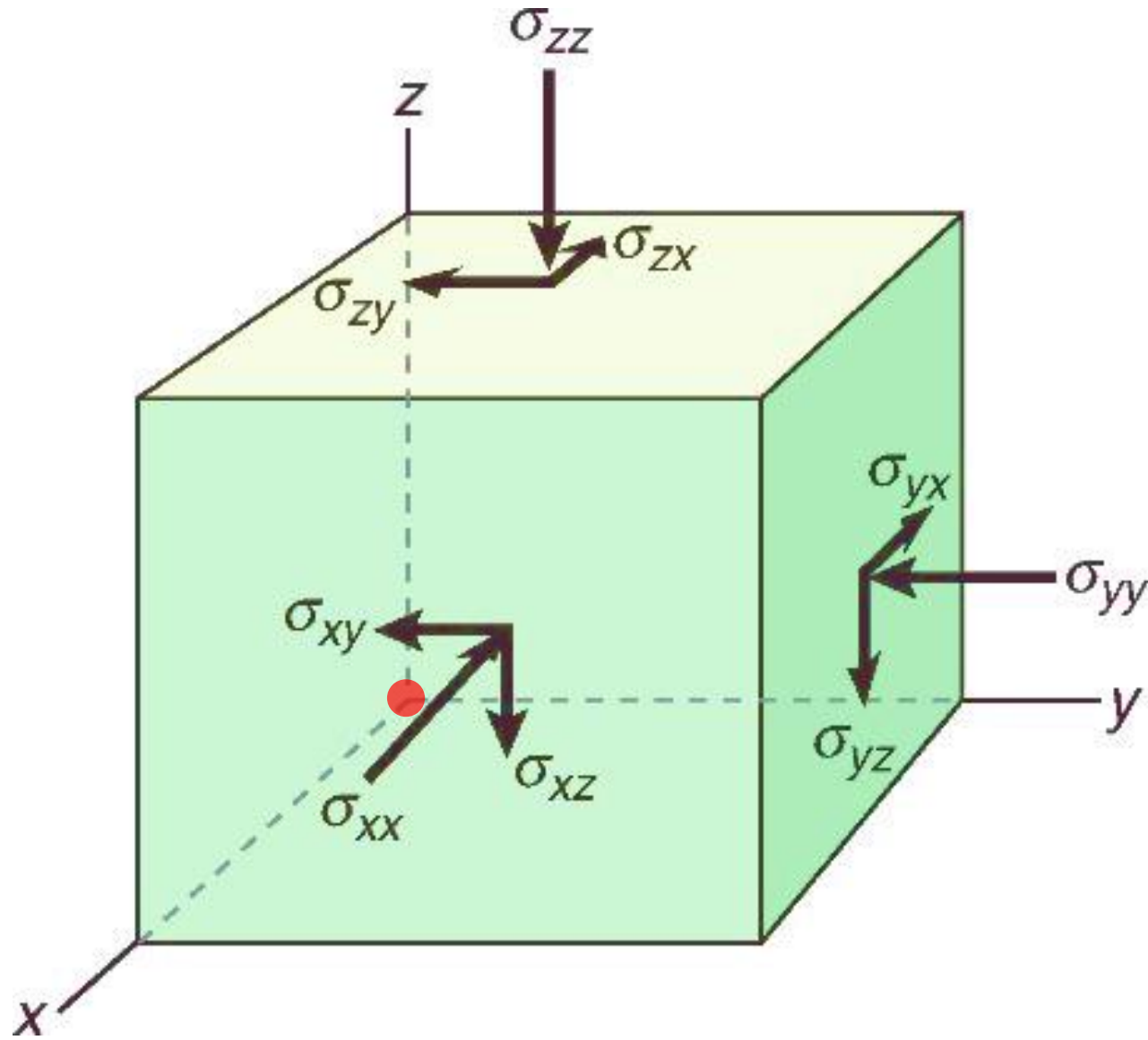
$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$$



- Χαρακτηρίζεται από **τρεις άξονες κάθετους μεταξύ τους**, πάνω στους οποίους βρίσκονται τρία ζεύγη ομοαξονικών και αντίρροπων τάσεων (συμπιεστικών ή εφελκυστικών), που αποκαλούνται **άξονες κυρίων τάσεων** ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$).
- Οι **κύριες τάσεις** είναι **ανύσματα, κάθετα στα 3 επίπεδα** που ορίζουν οι άξονες του ελλειψοειδούς τάσεων, που αποκαλούνται **επίπεδα κυρίων τάσεων** και στα οποία **δεν υφίσταται διατμητική συνιστώσα**.
- Από ένα **προσανατολισμένο ελλειψοειδές** τάσεων, μπορούμε να υπολογίσουμε το ζευγάρι των **τάσεων** που δρα πάνω σε οποιοδήποτε **επίπεδο** με οποιοδήποτε προσανατολισμό (βλπ. *Εργαστήριο*).



Τανυστής τάσεων (stress tensor)



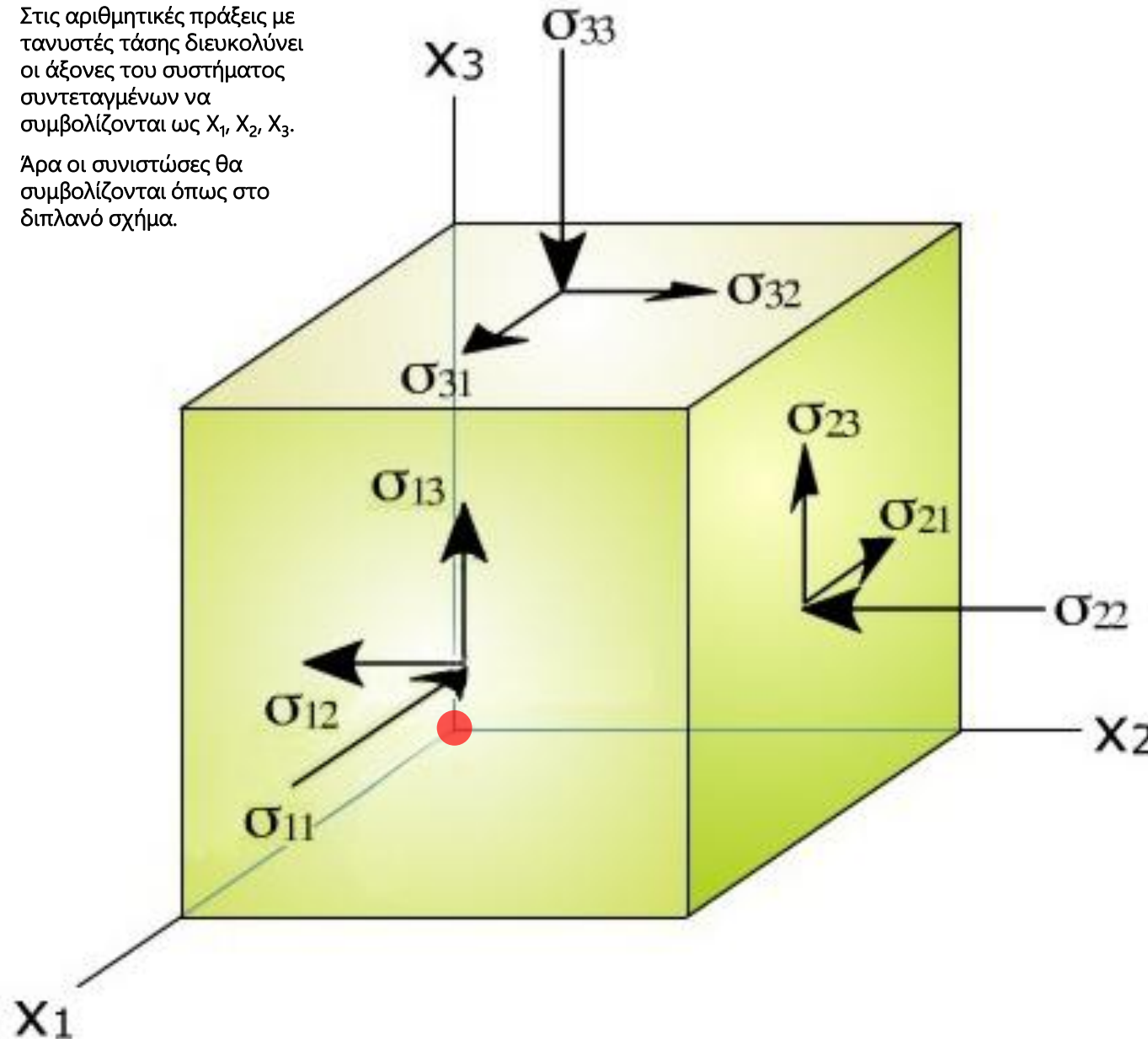
- Εκτός από το προσανατολισμένο ελλειψοειδές τάσεων, το **καθεστώς τάσεων** σε ένα **σημείο** περιγράφεται (προσδιορίζεται) και με ένα **τανυστή τάσης (stress tensor)**. Χρησιμοποιείται και διευκολύνει την επίλυση αριθμητικών προβλημάτων που σχετίζονται με τάσεις.
- Σε ένα **σημείο** ενός βραχύδου σώματος (●) τοποθετώ ένα **καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων x, y, z** (με συγκεκριμένο προσανατολισμό).
- Θεωρώ ένα **απειροελάχιστο κύβο** στο ίδιο σημείο, με 3 έδρες παράλληλες στα τρία επίπεδα (xy, xz, yz) που ορίζουν οι άξονες του συστήματος συντεταγμένων.
- Σε κάθε μία από τις 3 αυτές **έδρες** (επίπεδα) ασκείται μία **τάση** (συνήθως **πλάγια** σε αυτές).
- Κάθε μία από τις τάσεις αυτές **αναλύεται** σε **τρεις συνιστώσες**, μία ορθή κάθετη στο επίπεδο (έδρα) και δύο διατμητικές, παράλληλες με αυτό. Όπως έχουμε αναφέρει συμβολίζονται με συγκεκριμένο τρόπο.
- Άρα έχουμε τρεις ορθές τάσεις:
 - σ_{xx}
 - σ_{yy}
 - σ_{zz}
 και έξη διατμητικές:
 - σ_{xy}
 - σ_{xz}
 - σ_{yx}
 - σ_{yz}
 - σ_{zx}
 - σ_{zy}
- Άρα σε **κάθε σημείο** ενός βραχύδου σώματος, υπάρχουν **εννέα συνιστώσες τάσης** που δρουν πάνω σε τρία επίπεδα (ενός απειροελάχιστου κύβου), που ορίζουν οι άξονες x, y, z.

- Ορισμοί και βασικά μεγέθη
- Καθεστώς τάσης σε σημείο
- Μέση και αποκλίνουσα τάση
- Διάγραμμα και κύκλος του Mohr
- Καθεστώτα (τάσεων) αναφοράς
- Συνιστώσες καθεστώτων τάσεων
- Η θεωρία του Anderson για τη ρηγμάτωση
- Το κριτήριο θραύσης του Coulomb
- Κριτήρια Griffith και Von Mises

- Ορισμοί και βασικά μεγέθη
- Καθεστώς τάσης σε σημείο
- Μέση και αποκλίνουσα τάση
- Διάγραμμα και κύκλος του Mohr
- Καθεστώτα (τάσεων) αναφοράς
- Συνιστώσες καθεστώτων τάσεων
- Η θεωρία του Anderson για τη ρηγμάτωση
- Το κριτήριο θραύσης του Coulomb
- Κριτήρια Griffith και Von Mises

Στις αριθμητικές πράξεις με τανυστές τάσης διευκολύνει οι άξονες του συστήματος συντεταγμένων να συμβολίζονται ως X_1, X_2, X_3 .

Άρα οι συνιστώσες θα συμβολίζονται όπως στο διπλανό σχήμα.



- Τα μέτρα των 9 συνιστωσών τάσεων γράφονται σε ένα τετραγωνικό πίνακα 3x3, ο οποίος και αποτελεί τον τανυστή τάσης του συγκεκριμένου σημείου.

$$\begin{array}{l}
 \text{Σε επίπεδο } \perp \text{ στον άξονα } X_1 \rightarrow \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \\
 \text{Σε επίπεδο } \perp \text{ στον άξονα } X_2 \rightarrow \\
 \text{Σε επίπεδο } \perp \text{ στον άξονα } X_3 \rightarrow
 \end{array}$$

$$\begin{array}{ccc}
 \uparrow & \uparrow & \uparrow \\
 // \text{ με τη διεύθυνση του άξονα: } & X_1 & X_2 & X_3
 \end{array}$$

- Για να ορισθεί πλήρως ένας τανυστής τάσης χρειάζονται:
 - ο πίνακας των 9 συνιστωσών τάσεων και
 - το καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων του.
- Στους τανυστές τάσης οι τάσεις συμπίεσης λαμβάνονται ως αρνητικές και οι εφελκυστικές ως θετικές.
- Αν αλλάξουμε τον προσανατολισμό του συστήματος συντεταγμένων, για να προσδιορισθεί το καθεστώς τάσεων στο ίδιο σημείο του βραχώδους σώματος, θα πρέπει να αλλάξει ο τανυστής, δηλαδή ο πίνακας με τις 9 συνιστώσες.
- Άρα το καθεστώς τάσεων σε ένα σημείο μπορεί να εκφραστεί από ένα άπειρο σύνολο τανυστών τάσης.

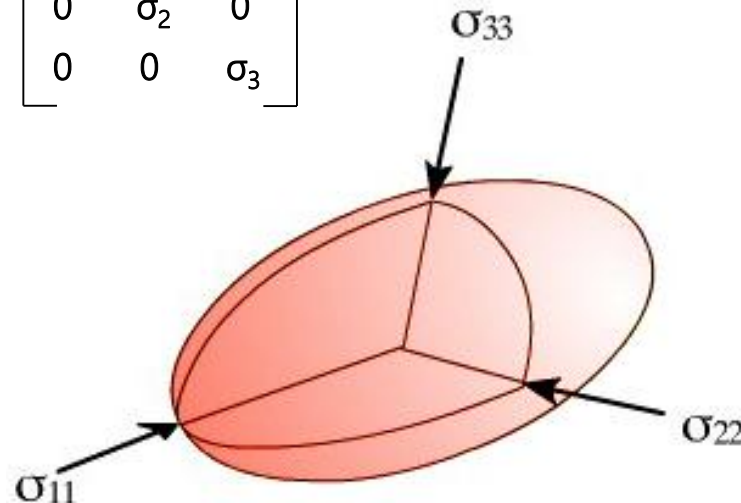
- Ορισμοί και βασικά μεγέθη
- Καθεστώς τάσης σε σημείο
- Μέση και αποκλίνουσα τάση
- Διάγραμμα και κύκλος του Mohr
- Καθεστώτα (τάσεων) αναφοράς
- Συνιστώσες καθεστώτων τάσεων
- Η θεωρία του Anderson για τη ρηγμάτωση
- Το κριτήριο θραύσης του Coulomb
- Κριτήρια Griffith και Von Mises

- Από το σύνολο αυτό των τανυστών, υπάρχει **ένας και μοναδικός τανυστής**, ο οποίος έχει **μηδενικές** όλες τις **διατμητικές συνιστώσες** τάσης του πίνακά του. Ένας τέτοιος πίνακας θα έχει τη μορφή:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{bmatrix}$$

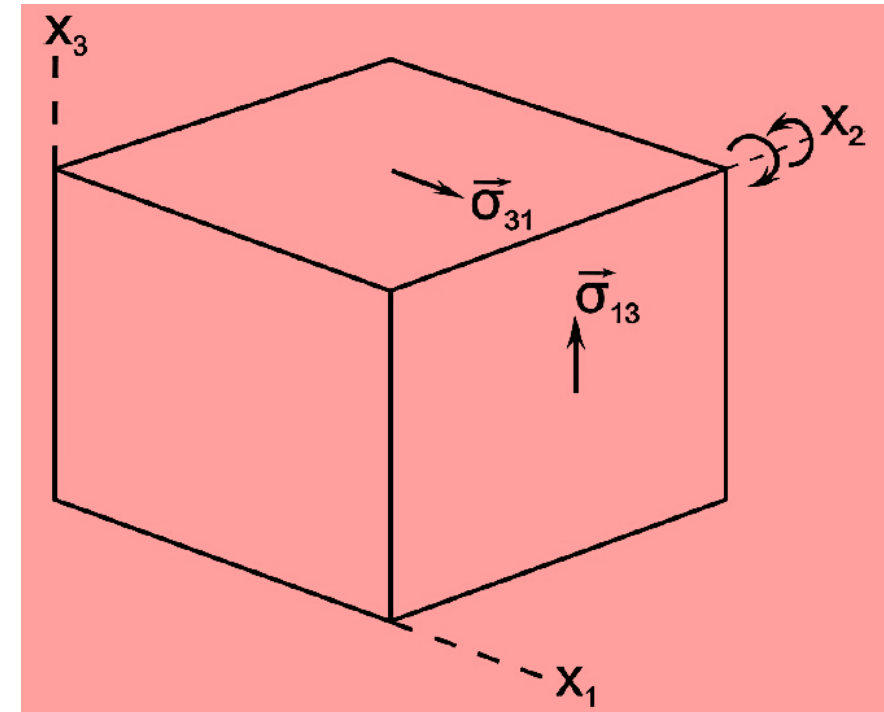
- Στην περίπτωση αυτή οι τάσεις που ασκούνται στα τρία επίπεδα που ορίζονται από τους άξονες X_1, X_2, X_3 του συστήματος συντεταγμένων, είναι κάθετες σε αυτά, γι' αυτό και δεν υπάρχουν διατμητικές συνιστώσες.
- Οι τάσεις αυτές είναι οι κύριες τάσεις $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ από τις οποίες μπορούμε να προσδιορίσουμε το σχήμα του ελλειψοειδούς των τάσεων. Άρα ο πίνακας παίρνει τη μορφή:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix}$$



Οι έξη ανεξάρτητες συνιστώσες τάσης

- Από τις 9 συνιστώσες τάσης μόνο οι έξι είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους και αυτό γιατί οι διατμητικές συνιστώσες είναι ανά δύο ίσες, αλλιώς θα υπήρχε περιστροφή του κύβου, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



- Άρα $\sigma_{12} = -\sigma_{21}$, $\sigma_{13} = -\sigma_{31}$, & $\sigma_{23} = -\sigma_{32}$. Άρα ο πίνακας μπορεί να πάρει τη μορφή:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{12} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{13} & \sigma_{23} & \sigma_{33} \end{bmatrix}$$

- Ορισμοί και βασικά μεγέθη
- Καθεστώς τάσης σε σημείο
- Μέση και αποκλίνουσα τάση
- Διάγραμμα και κύκλος του Mohr
- Καθεστώτα (τάσεων) αναφοράς
- Συνιστώσες καθεστώτων τάσεων
- Η θεωρία του Anderson για τη ρηγμάτωση
- Το κριτήριο θραύσης του Coulomb
- Κριτήρια Griffith και Von Mises

Ο **τανυστής τάσης** που περιγράφει το **συνολικό καθεστώς τάσεων (total stress – σ_{tot})** σε ένα σημείο, αποτελείται από δύο συμμετρικές συνιστώσες.

$$\sigma_{tot} = \sigma_m + \sigma_{dev}$$

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{12} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{13} & \sigma_{23} & \sigma_{33} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \sigma_m & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_m & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma_{11}-\sigma_m & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{12} & \sigma_{22}-\sigma_m & \sigma_{23} \\ \sigma_{13} & \sigma_{23} & \sigma_{33}-\sigma_m \end{bmatrix}$$

Η σ_m είναι η **ισότροπη (isotropic) συνιστώσα**, η ονομαζόμενη **μέση τάση (mean stress)** και αντιστοιχεί στο μέσο όρο των κύριων τάσεων:

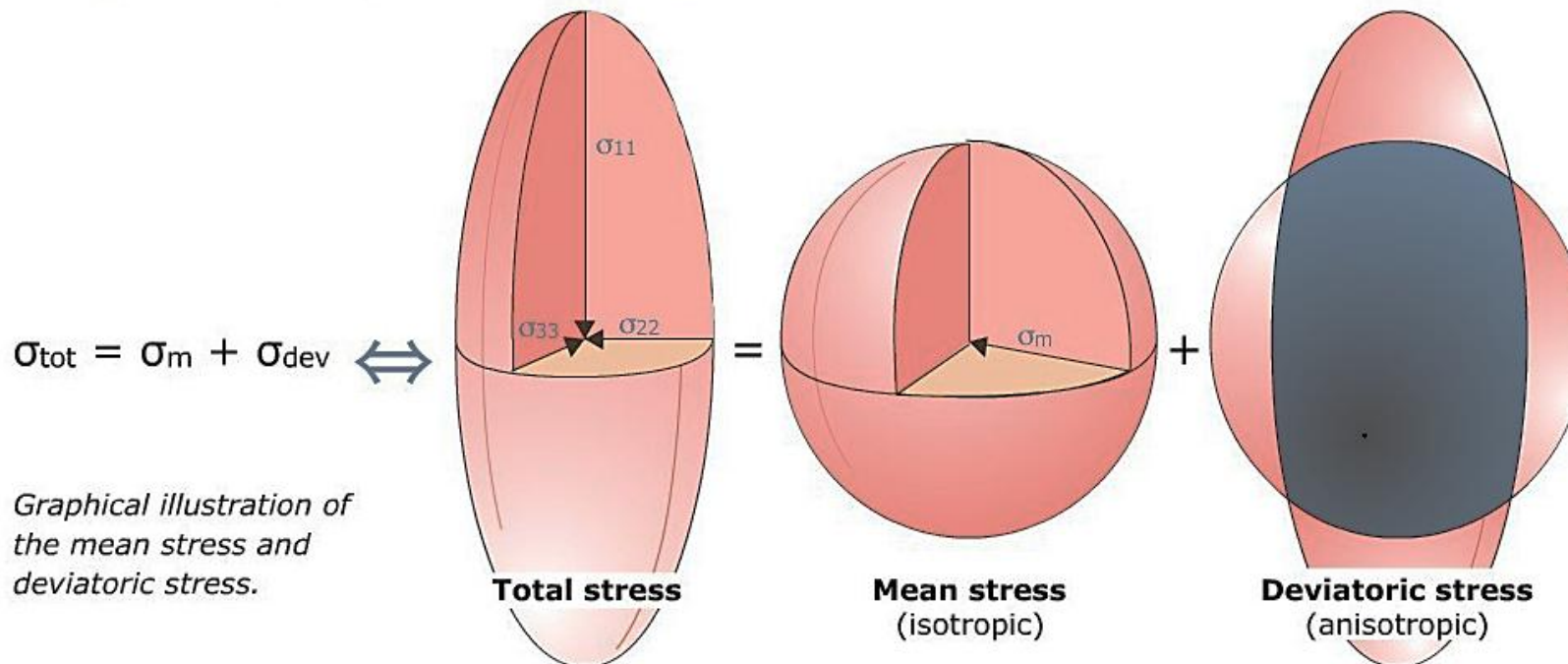
$$\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3$$

Η σ_{dev} είναι η **ανισότροπη (anisotropic) συνιστώσα**, η ονομαζόμενη **αποκλίνουσα τάση (deviatoric stress)** και αντιστοιχεί στη διαφορά ανάμεσα στη συνολική τάση και τη μέση τάση.

$$\sigma_{tot} = \sigma_m + \sigma_{dev}$$

or

$$\sigma_{dev} = \sigma_{tot} - \sigma_m$$



Στην περίπτωση που η συνιστώσα της **αποκλίνουσας τάσης** είναι 0, τότε το ελλειψοειδές τάσεων είναι μια **τέλεια σφαίρα** όπου: $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$.

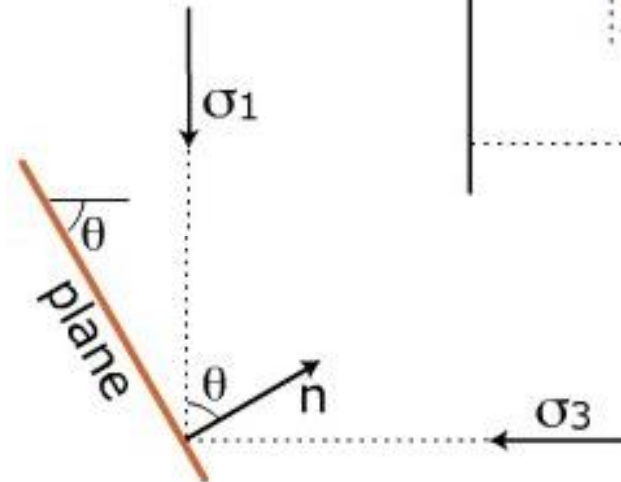
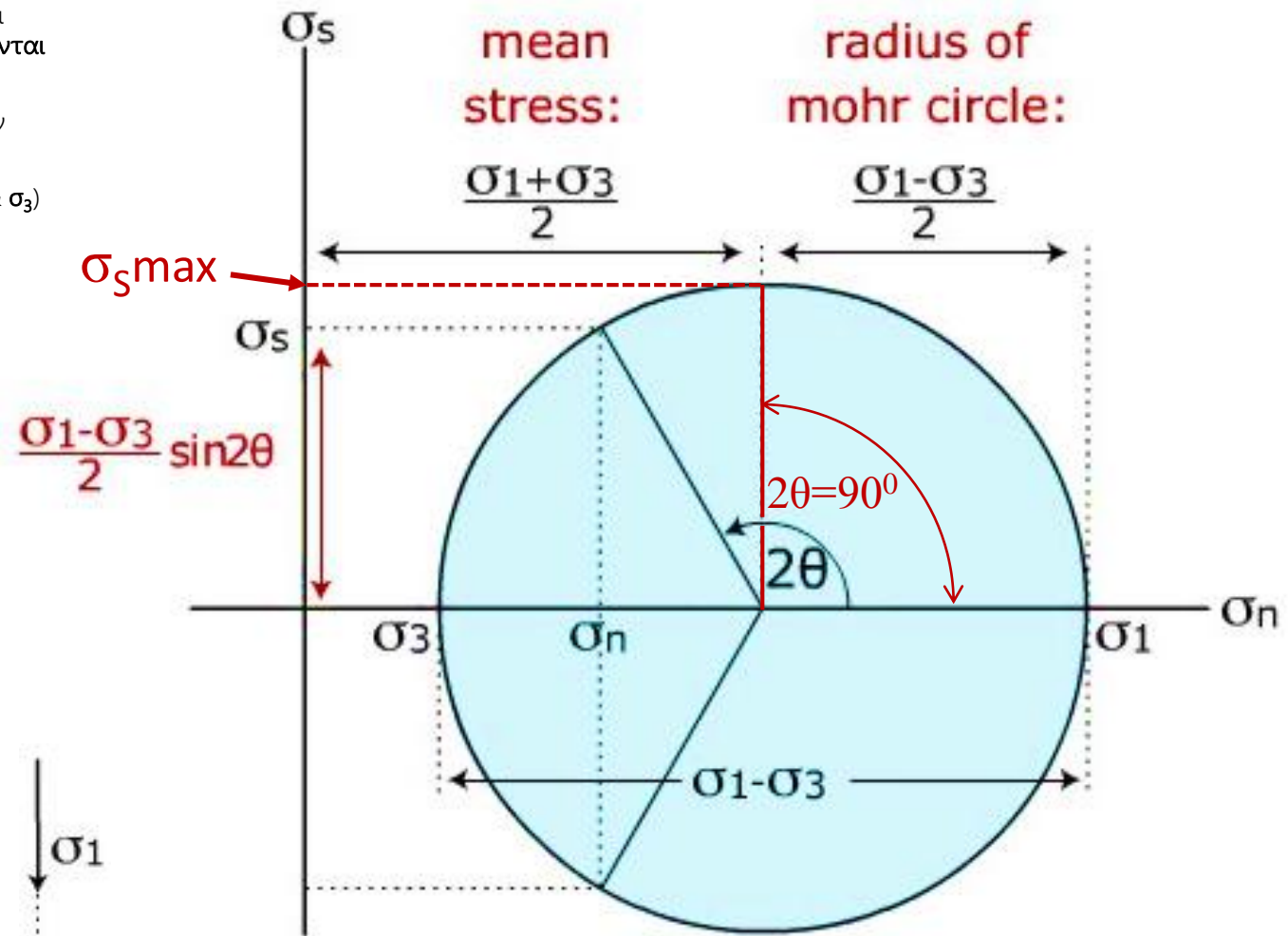
Η κατάσταση αυτή αναφέρεται ως **υδροστατική τάση (hydrostatic stress)** ή **υδροστατική πίεση (hydrostatic pressure)**.

Η **αποκλίνουσα τάση** τυπικά αντιστοιχεί στην συνιστώσα της **τεκτονικής τάσης (tectonic stress)** στο στερεό φλοιό της Γης και η συνιστώσα της **μέσης τάσης** στη **λιθοστατική πίεση (lithostatic pressure)**.

Συνήθως η **τεκτονική τάση** (ανισότροπη συνιστώσα) είναι **πολύ μικρότερη** από την **λιθοστατική πίεση** (ισότροπη συνιστώσα), αλλά έχει **πολύ μεγάλη σημασία** γιατί είναι αυτή που συνδέεται με την **τροπή ή διαστροφική παραμόρφωση (strain)** και τη δημιουργία των **τεκτονικών δομών**.

- Ορισμοί και βασικά μεγέθη
- Καθεστώτς τάσης σε σημείο
- Μέση και αποκλίνουσα τάση
- Διάγραμμα και κύκλος του Mohr
- Καθεστώτα (τάσεων) αναφοράς
- Συνιστώσες καθεστώτων τάσεων
- Η θεωρία του Anderson για τη ρηγμάτωση
- Το κριτήριο θραύσης του Coulomb
- Κριτήρια Griffith και Von Mises

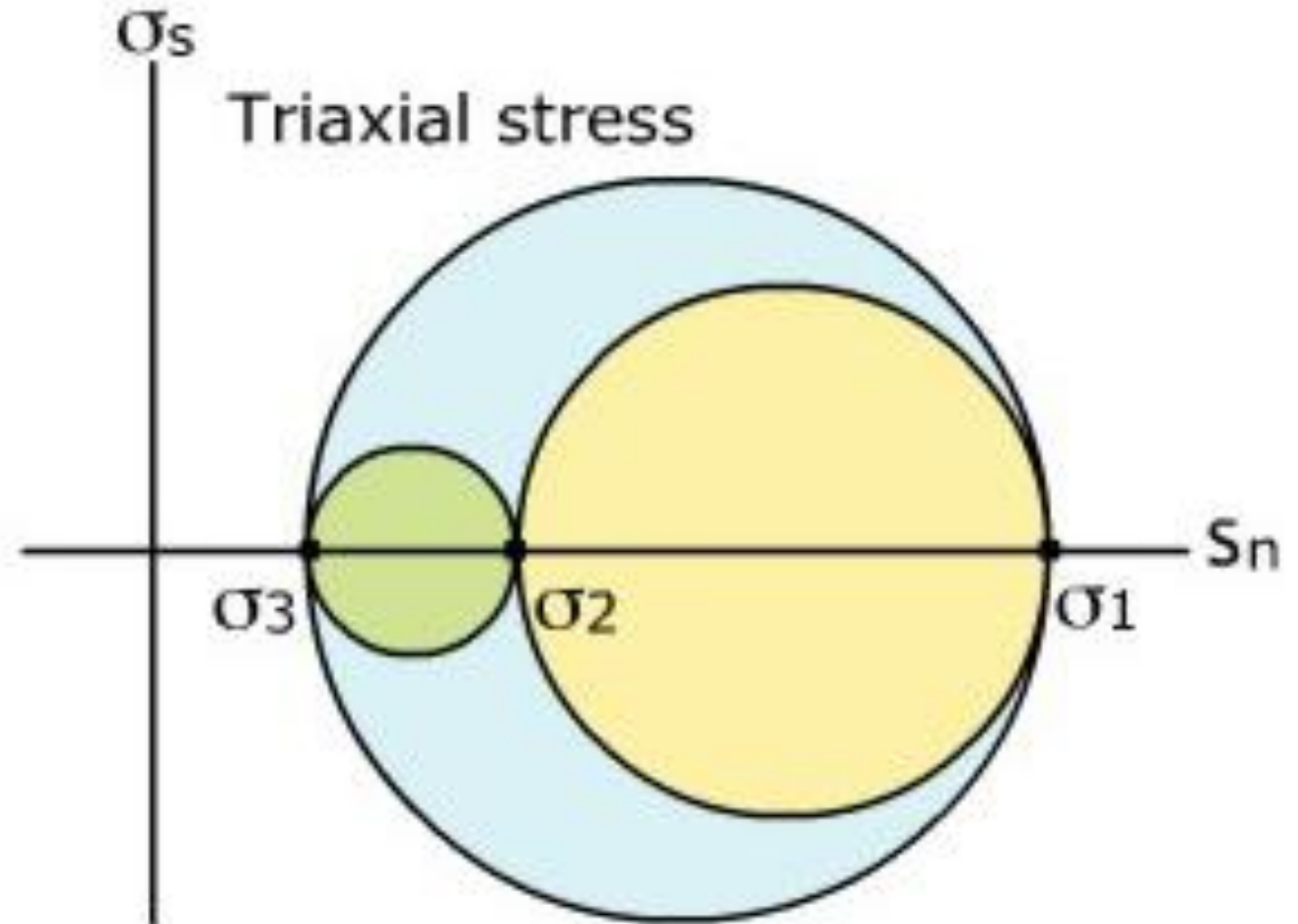
- Το διάγραμμα του κύκλου του Mohr απεικονίζει τις **ορθές** και **διατμητικές** τάσεις που δρουν σε όλα τα **επίπεδα** που **διέρχονται** από τον σ_2 .
- Στον **οριζόντιο** άξονα προβάλλονται οι **ορθές** τάσεις και στον **κατακόρυφο** οι **διατμητικές**.
- Ο **μέγιστος** και ο **ελάχιστος** άξονας των κυρίων τάσεων (σ_1 & σ_3) προβάλλονται στον οριζόντιο άξονα και η **διαφορά** τους (η απόσταση ανάμεσα στην προβολή του σ_1 & σ_3) αποτελεί τη **διάμετρο** του **κύκλου του Mohr**.
- Το **κέντρο** του **κύκλου** έχει συντεταγμένες $[(\sigma_1 + \sigma_3)/2, 0]$.
- Οποιοδήποτε **σημείο** της περιφέρειας του κύκλου μας δίνει μια ορθή και μια διατμητική τάση που δρουν στο **επίπεδο** που η κάθετος σε αυτό σχηματίζει **γωνία θ** με τον σ_1 (**ΠΡΟΣΟΧΗ**: η γωνία ανάμεσα στην ακτίνα του κύκλου -που ενώνει το κέντρο του κύκλου με το σημείο στην περιφέρεια- και τον οριζόντιο άξονα είναι 2θ). Αν ο σ_1 είναι **κατακόρυφος**, τότε η **γωνία θ** αντιστοιχεί και στην **κλίση** του **επιπέδου** (βλπ. το μικρό σχήμα).
- Δύο **αντιδιαμετρικά** σημεία στην περιφέρεια του κύκλου αντιπροσωπεύουν επίπεδα με **γωνιακή σχέση 90°** .
- Η **μέγιστη** τιμή για την **διατμητική τάση** προκύπτει όταν η γωνία $2\theta = 90^\circ$, δηλαδή όταν η γωνία θ που σχηματίζει ο σ_1 με το επίπεδο είναι 45° .
- Η διαφορά ($\sigma_1 - \sigma_3$) αποκαλείται **διαφορική τάση (differential stress)** και έχει μεγάλη σημασία στη μηχανική των διαρρήξεων.
- Στις γεωλογικές εφαρμογές, όπως έχει αναφερθεί) το διάγραμμα του Mohr κατασκευάζεται έτσι ώστε οι **συμπιεστικές τάσεις** να θεωρούνται **θετικές** και οι **εφελκυστικές αρνητικές**. Το αντίθετο χρησιμοποιείται από τους γεωτεχνικούς μηχανικούς.



- Στη λιθόσφαιρα οι τάσεις είναι συμπιεστικές, όχι όμως πάντα. Για τις **εφελκυστικές τάσεις** ο κύκλος του Mohr μετακινείται **αριστερά** στο διάγραμμα, προς τις **αρνητικές τιμές** του οριζόντιου άξονα .
- Αν και οι τρεις κύριες τάσεις είναι εφελκυστικές (μια ασυνήθιστη κατάσταση στη γεωλογία), τότε ο κύκλος βρίσκεται εξ' ολοκλήρου αριστερά από τον κατακόρυφο άξονα.

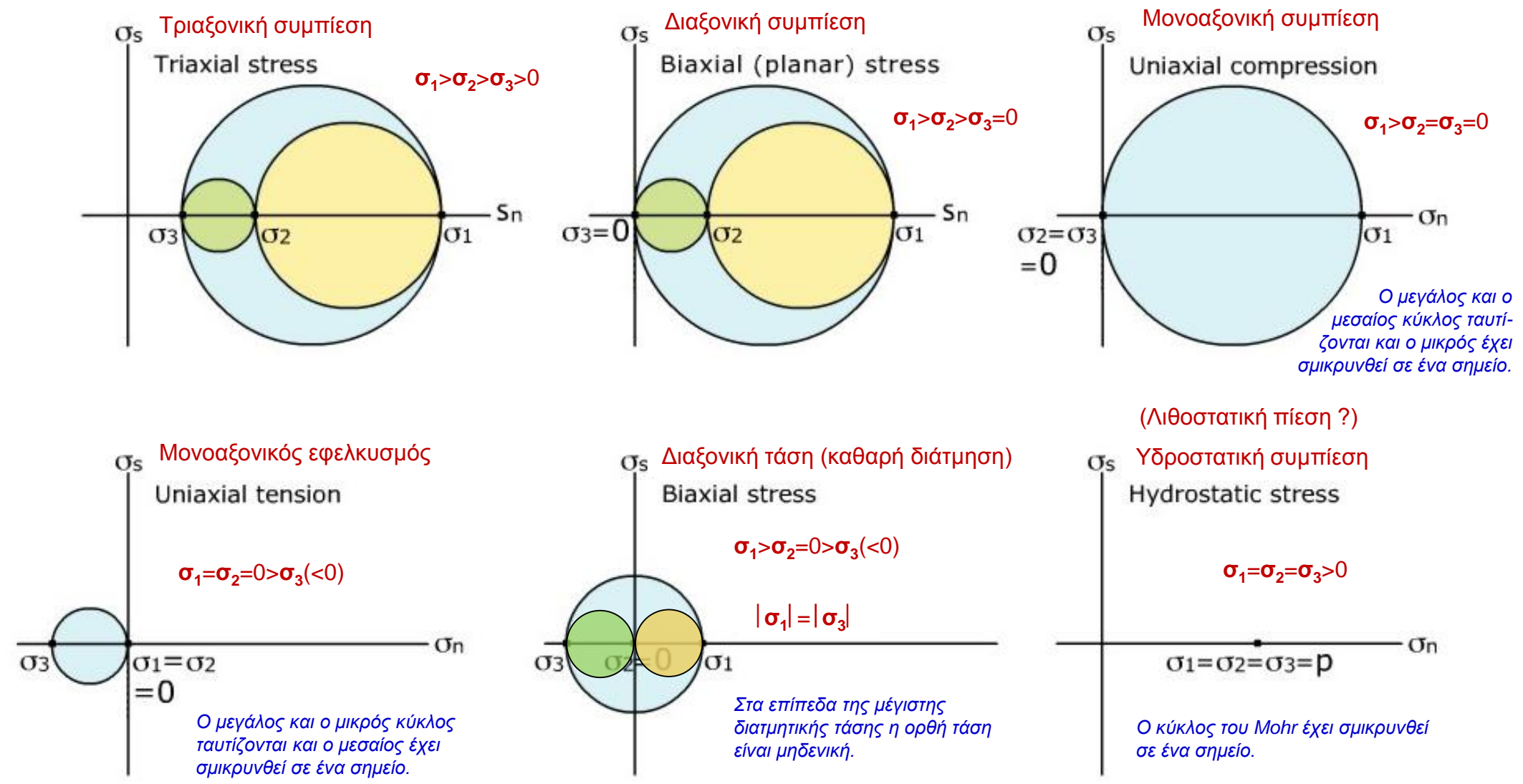
- Ορισμοί και βασικά μεγέθη
- Καθεστώς τάσης σε σημείο
- Μέση και αποκλίνουσα τάση
- Διάγραμμα και κύκλος του Mohr
- Καθεστώτα (τάσεων) αναφοράς
- Συνιστώσες καθεστώτων τάσεων
- Η θεωρία του Anderson για τη ρηγμάτωση
- Το κριτήριο θραύσης του Coulomb
- Κριτήρια Griffith και Von Mises

- Το διάγραμμα του Mohr, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στις **τρεις διαστάσεις**, όπου όλοι οι κύριοι άξονες τάσεων προβάλλονται στον οριζόντιο άξονα.
- Σχηματίζουμε έτσι άλλους δύο κύκλους, έναν με διάμετρο τη διαφορά ανάμεσα στους σ_1 & σ_2 (που είναι και ο **μεσαίος** σε μέγεθος) και έναν με διάμετρο τη διαφορά ανάμεσα στους σ_2 & σ_3 (που είναι και ο **μικρότερος** σε μέγεθος).
- Όπως αναφέρθηκε ο **μεγάλος** κύκλος, που αντιστοιχεί στη διαφορά σ_1 & σ_3 μας δίνει τις τάσεις (ορθές και διατμητικές) που ασκούνται σε επίπεδα που **περιλαμβάνουν** τον σ_2 , δηλαδή είναι **κάθετα** στο επίπεδο $\sigma_1 \sigma_3$.
- Αντίστοιχα ο **μεσαίος**, που αντιστοιχεί στη διαφορά σ_1 & σ_2 μας δίνει τις τάσεις (ορθές και διατμητικές) που ασκούνται σε επίπεδα που **περιλαμβάνουν** τον σ_3 , δηλαδή είναι **κάθετα** στο επίπεδο $\sigma_1 \sigma_2$ και ο **μικρός** αυτές που ασκούνται σε επίπεδα που **περιλαμβάνουν** τον σ_1 , δηλαδή είναι **κάθετα** στο επίπεδο $\sigma_2 \sigma_3$.



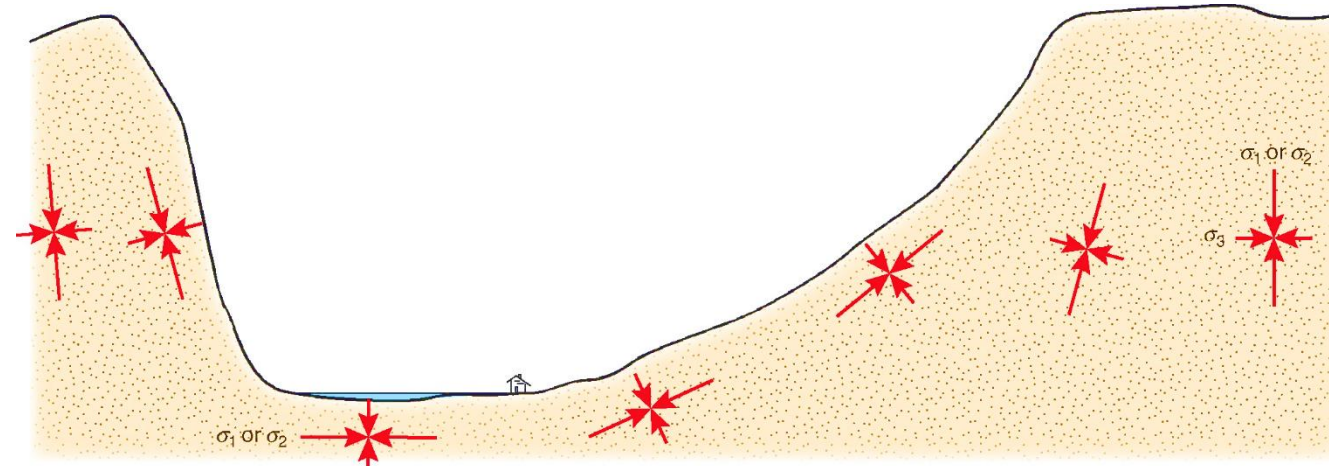
- Ορισμοί και βασικά μεγέθη
- Καθεστώς τάσης σε σημείο
- Μέση και αποκλίνουσα τάση
- Διάγραμμα και κύκλος του Mohr
- Καθεστώτα (τάσεων) αναφοράς
- Συνιστώσες καθεστώτων τάσεων
- Η θεωρία του Anderson για τη ρηγμάτωση
- Το κριτήριο θραύσης του Coulomb
- Κριτήρια Griffith και Von Mises

Καθεστώτα τάσης (states of stress)

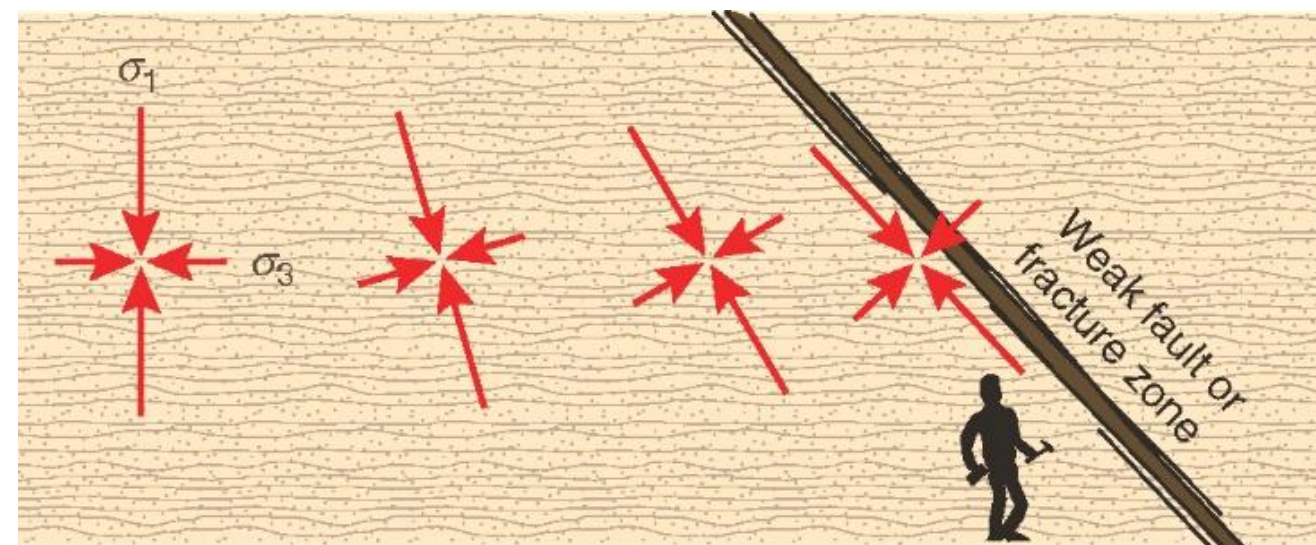


- Ορισμοί και βασικά μεγέθη
- Καθεστώς τάσης σε σημείο
- Μέση και αποκλίνουσα τάση
- Διάγραμμα και κύκλος του Mohr
- Καθεστώτα (τάσεων) αναφοράς
- Συνιστώσες καθεστώτων τάσεων
- Η θεωρία του Anderson για τη ρηγμάτωση
- Το κριτήριο θραύσης του Coulomb
- Κριτήρια Griffith και Von Mises

- Τα **καθεστώτα τάσης** (state o stress) αναφέρονται σε ένα **σημείο** στο βραχώδες σώμα, μια δεδομένη **χρονική στιγμή**.
- Σε μια μεγάλη λιθολογική ενότητα (π.χ. ένα τμήμα του στερεού φλοιού ή σε μία λιθοσφαιρική πλάκα) το **καθεστώς τάσης αλλάζει από θέση σε θέση την ίδια χρονική στιγμή**, αλλά και για το ίδιο σημείο το **καθεστώς τάσης αλλάζει με την πάροδο του χρόνου**.
- Το **σύνολο των καθεστώτων τάσης**, όλων των σημείων ενός γεωλογικού σώματος (βραχώδους συστήματος), καθορίζει το **πεδίο τάσεων (stress field)**.
- **Ομογενές πεδίο τάσεων** = το ίδιο καθεστώς τάσης σε **κάθε σημείο** = οι **συνιστώσες** του ταυστή τάσης (για ίδιο προσανατολισμό αξόνων του συστήματος συντεταγμένων) **δεν αλλάζουν** από θέση σε θέση.
- Τα πεδία τάσεων είναι συνήθως **ετερογενή** γιατί:
 - Υπάρχουν πάντα **δυνάμεις σώματος** που προκαλούν αποκλίσεις στις τάσεις από θέση σε θέση.
 - Τα διάφορα τμήματα του φλοιού παρουσιάζουν **ανομοιογένειες** [λιθολογικές, λόγω ασυνεχειών (π.χ. ρήγματα), τοπογραφικές (για το ανώτερο μόνον τμήμα του φλοιού) κλπ.] και άρα **αντιστέκονται με διαφορετικό τρόπο στην παραμόρφωση** και άρα φέρουν **διαφορετικές τάσεις**.
- Οι όροι **καθεστώς τάσεων (state o stress)** και **πεδίο τάσεων (stress field)** ενίοτε χρησιμοποιούνται και ως συνώνυμα.



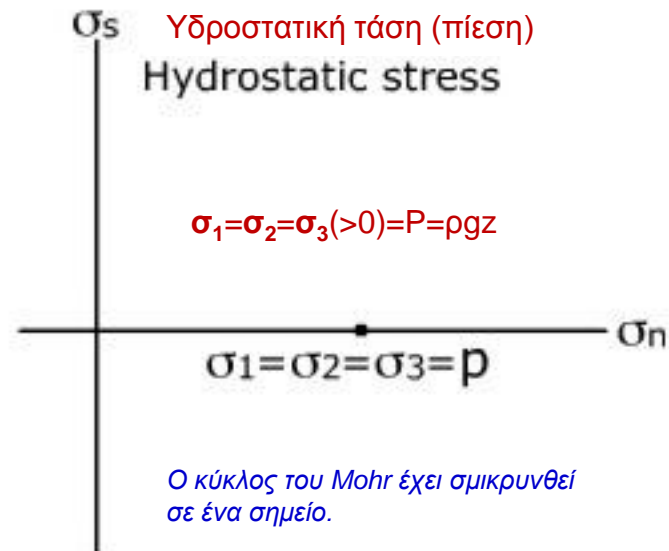
↑ Μεταβολή του καθεστώτος τάσεων γύρω από μια βαθιά κοιλάδα. Μία από τις κύριες τάσεις θα είναι πάντα κάθετη στην επιφάνεια του εδάφους. Οι μεταβολές αυτές ισχύουν μόνο κοντά στην επιφάνεια, αλλά έχουν σημαντικές εφαρμογές (σήραγγες, τοιχία κλπ.).



↑ Αλλαγή του καθεστώτος τάσεων από θέση σε θέση σε ένα βραχώδες σώμα, λόγω της ανομοιογένειας που παρατηρείται στη ζώνη ενός ρήγματος.

- Ορισμοί και βασικά μεγέθη
- Καθεστώς τάσης σε σημείο
- Μέση και αποκλίνουσα τάση
- Διάγραμμα και κύκλος του Mohr
- Καθεστώς (τάσεων) αναφοράς
- Συνιστώσες καθεστώςων τάσεων
- Η θεωρία του Anderson για τη ρηγμάτωση
- Το κριτήριο θραύσης του Coulomb
- Κριτήρια Griffith και Von Mises

- **Ιδεατά μοντέλα** αναφοράς για τη μεταβολή των καθεστώςων τάσεων στη λιθόσφαιρα.
- Παραδοχή για ένα "στατικό πλανήτη" με ένα ομοιογενές λιθοσφαιρικό περίβλημα, χωρίς τεκτονικές διαδικασίες (δηλαδή χωρίς τεκτονικές δυνάμεις, χωρίς την πολυπλοκότητα που συνεπάγεται η κίνηση των λιθοσφαιρικών πλακών).
- Άρα για να υπολογισθούν οι **τεκτονικές τάσεις** αρκεί να υπολογισθούν οι **αποκλίσεις** από το **μοντέλο αναφοράς** για το καθεστώς τάσεων.
- Τρία **θεμελιώδη** τέτοια καθεστώςα αναφοράς είναι:
 - ΛΙΘΟΣΤΑΤΙΚΟ/ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΟ ΚΑΘΕΣΤΩΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ
 - ΚΑΘΕΣΤΩΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗΣ-ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ
 - ΚΑΘΕΣΤΩΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΣΤΑΘΕΡΗΣ-ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ-ΤΑΣΗΣ.



Λιθοστατικό/Υδροστατικό καθεστώς αναφοράς (Lithostatic/Hydrostatic reference state)

- Το **απλούστερο μοντέλο** για το εσωτερικό της Γης.
- Τα πετρώματα **δεν παρουσιάζουν διατμητική αντοχή** ($\sigma_s = 0$).
- Οι **άξονες των κυρίων τάσεων** είναι **ίσοι** μεταξύ τους και το **ελλειψοειδές τάσεων** αντιστοιχεί σε **σφαίρα**.

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 \Leftrightarrow \sigma_H = \sigma_h = \sigma_V \text{ και } \sigma_V = \rho g z = P, \text{ όπου:}$$

σ_H η max οριζόντια τάση,
 σ_h η min οριζόντια τάση,
 σ_V η κατακόρυφη τάση,
 ρ η πυκνότητα των υπερκείμενων ιζημάτων,
 g η επιτάχυνση της βαρύτητας,
 z το ύψος της στήλης των υπερκείμενων ιζημάτων &
 P η πίεση.

- Δηλαδή ένα τέτοιο γεωλογικό σώμα **δεν μπορεί να υποστηρίξει διαφορικές τάσεις** ($\sigma_1 - \sigma_3$) με την πάροδο του γεωλογικού χρόνου.
- Άρα το καθεστώς τάσεων περιγράφεται ως ένα **σημείο** στον οριζόντιο άξονα του **διαγράμματος του Mohr**.
- Που σημαίνει ότι η **τάση** είναι **ανεξάρτητη** από τη **διεύθυνση** του **επιπέδου**.
- Στην πραγματικότητα **δεν υπάρχουν συμπαγή πετρώματα** που να υφίστανται **μόνο λιθοστατικό καθεστώς τάσεων**.
- Εφαρμογή υπάρχει μόνο:
 - σε **μαγματικούς θαλάμους** (magma chamber), όπου ο όρος **υδροστατική πίεση** είναι ποιο κατάλληλος και
 - σε **κρατονικά τεμάχια** και **ασπίδες** που είναι **τεκτονικά ανενεργά** για δεκάδες ή εκατοντάδες εκ. χρόνια, όπου τα πετρώματα συμπεριφέρονται **ως υγρά** (πολύ χαμηλή διατμητική αντοχή) κάτω από **χαμηλές τάσεις** και **χαμηλούς ρυθμούς παραμόρφωσης**.

- Ορισμοί και βασικά μεγέθη
- Καθεστώς τάσης σε σημείο
- Μέση και αποκλίνουσα τάση
- Διάγραμμα και κύκλος του Mohr
- Καθεστώτα (τάσεων) αναφοράς
- Συνιστώσες καθεστώτων τάσεων
- Η θεωρία του Anderson για τη ρηγμάτωση
- Το κριτήριο θραύσης του Coulomb
- Κριτήρια Griffith και Von Mises

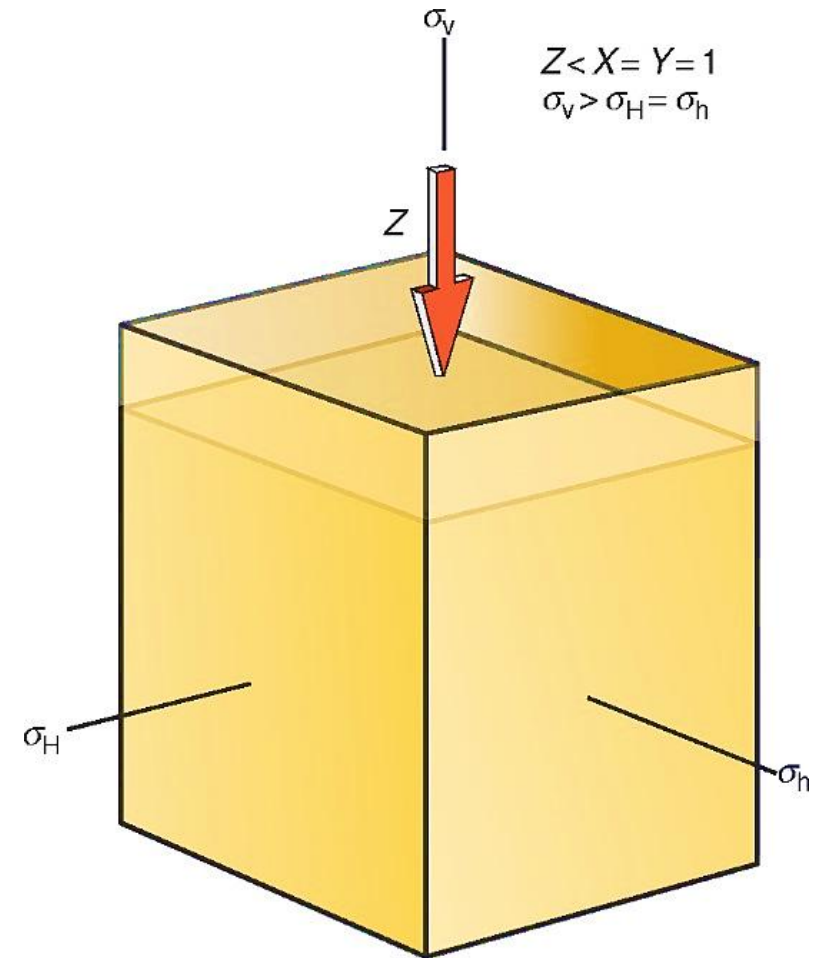
- Σχετίζεται με τη **μονοαξονική παραμόρφωση**, όπου βράχυνση (ή έκταση) μπορεί να γίνει μόνο στη μία διεύθυνση.
- Έχει εφαρμογή στις **ιζηματογενείς λεκάνες**, με καθορισμένα (σταθερά) περιθώρια.
- Οι **τάσεις** που ασκούνται στα ιζήματα της λεκάνης οφείλονται στα **υπερκείμενα ιζήματα** και τα **περιθώρια** της λεκάνης.
- Βράχυνση (ή έκταση) μπορεί να γίνει μόνο στην **κατακόρυφη διεύθυνση**.
- Η κατακόρυφη τάση $\sigma_v = \sigma_1 = \rho gh$.
- Οι οριζόντιες τάσεις (σ_H & σ_h) αυξάνουν από την επίδραση της κατακόρυφης τάσης σ_v .
- $\sigma_H = \sigma_h = \sigma_2 = \sigma_3 = [\nu / (1-\nu)] \sigma_v = [\nu / (1-\nu)] \rho gh$, όπου:

σ_H η max οριζόντια τάση,
 σ_h η min οριζόντια τάση,
 σ_v η κατακόρυφη τάση,
 ρ η πυκνότητα των υπερκείμενων ιζημάτων,
 g η επιτάχυνση της βαρύτητας,
 h το ύψος της στήλης των υπερκείμενων ιζημάτων &
 ν ο λόγος του Poisson.

Δηλαδή το **μέγεθος** των **οριζόντιων τάσεων** εξαρτάται από τη **μηχανική συμπεριφορά** των ιζημάτων.

- Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό οι **οριζόντιες τάσεις** προβλέπεται να είναι **ίσες** με το **ήμισυ**, ή το **1/3**, της **κατακόρυφης τάσης** (με δεδομένο ότι ο λόγος Poisson για τα πετρώματα τυπικά έχει τιμές που κυμαίνονται από 0.25–0.33).
- Η τιμή αυτή είναι πολύ **μικρότερη** από αυτή που προβλέπεται από το **προηγούμενο μοντέλο** (όπου $\sigma_H = \sigma_h = \sigma_v$). Τα δύο μοντέλα πλησιάζουν το ένα το άλλο όταν τα **ιζήματα γίνονται όλο και περισσότερα συμπτυκνωμένα και συνεκτικά**.
- Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό το **καθεστώς των τάσεων** είναι χαρακτηριστικό σε **εκτατικά περιβάλλοντα (extensional regimes $\rightarrow \sigma_v > \sigma_H \geq \sigma_h$)**.
- Το καθεστώς αναφοράς της μονοαξονικής-παραμόρφωσης (αναφέρεται και ως **μονοαξονικό καθεστώς αναφοράς – uniaxial reference state**), **δεν πρέπει να συγχέεται** με τη **μονοαξονική τάση (uniaxial stress)**, που **περιγράφει το καθεστώς τάσης σε ένα σημείο, όπου μόνο ο ένας από τους άξονες των κύριων τάσεων είναι $\neq 0$** .

*Καθεστώς αναφοράς μονοαξονικής-παραμόρφωσης
(Uniaxial-strain reference state)*



Uniaxial strain
(compaction)

- Ορισμοί και βασικά μεγέθη
- Καθεστώς τάσης σε σημείο
- Μέση και αποκλίνουσα τάση
- Διάγραμμα και κύκλος του Mohr
- Καθεστώτα (τάσεων) αναφοράς
- Συνιστώσες καθεστώτων τάσεων
- Η θεωρία του Anderson για τη ρηγμάτωση
- Το κριτήριο θραύσης του Coulomb
- Κριτήρια Griffith και Von Mises

**Καθεστώς αναφοράς σταθερής-οριζόντιας-τάσης
(Constant-horizontal-stress reference state)**

$$\sigma_h^* = \sigma_h(z_1 / (z_1 - z)) - \rho_1 g h (\rho_1 / \rho_m) [(z_1 - z / 2) / z_1 - z]$$

increase in stress due to thinning of the crust;

change of stress due to isostatic adjustments.

- Αποτελεί το πιο **ρεαλιστικό** και **εφαρμόσιμο μοντέλο** για την περιγραφή των τάσεων στον φλοιό.
- Το μοντέλο προϋποθέτει ότι οι **τάσεις** στο **βάθος** της **ισοστατικής εξισορρόπησης (Z_1)** είναι **ίσες, ανεξάρτητα** από το τοπικό **πάχος** του υπερκείμενου φλοιού.
- Το Z_1 καθορίζει το **κατώτερο όριο** του φλοιού με **ελαστικο-πλαστικά** χαρακτηριστικά παραμόρφωσης.
- Κάτω από το Z_1 , ο **μανδύας, δεν παρουσιάζει διατμητική αντοχή** με την πάροδο του γεωλογικού χρόνου και συμπεριφέρεται σαν υγρό:

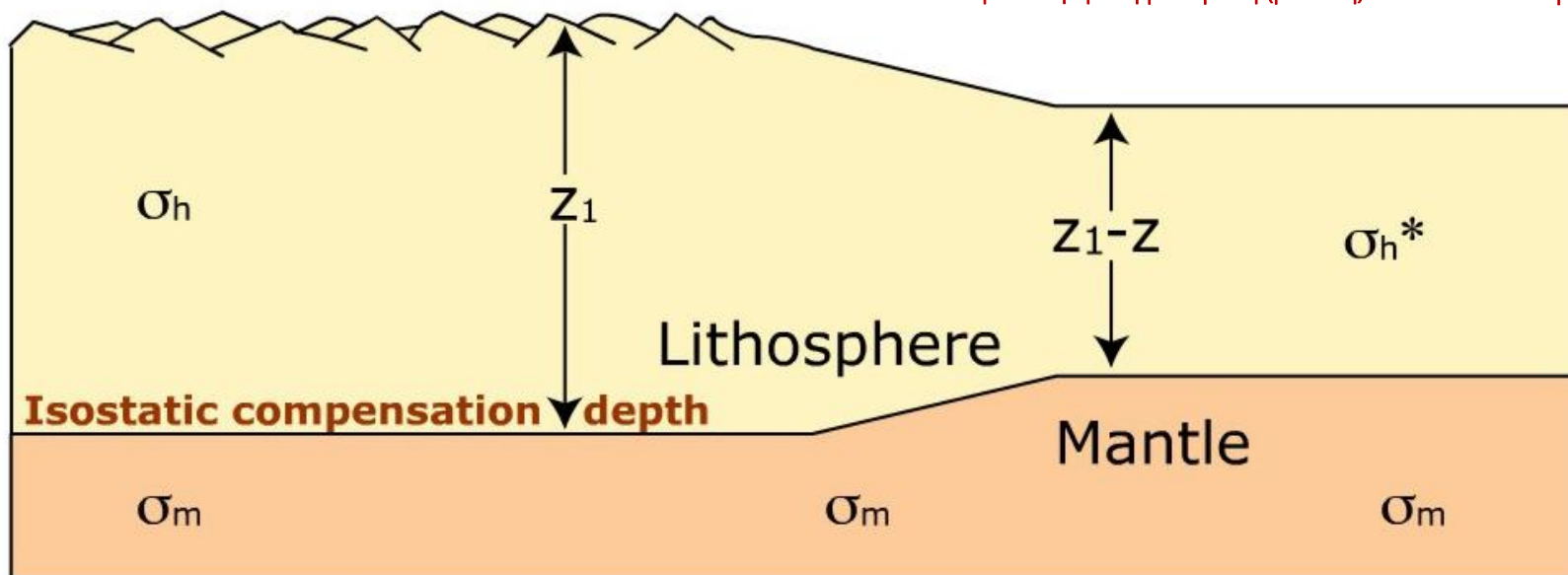
$$\sigma_H = \sigma_h = \sigma_v = \sigma_m \rightarrow \text{lithostatic}$$

δηλαδή η **λιθοστατική τάση σ_m** καθορίζεται από το **πάχος** του **υπερκείμενου φλοιού**.

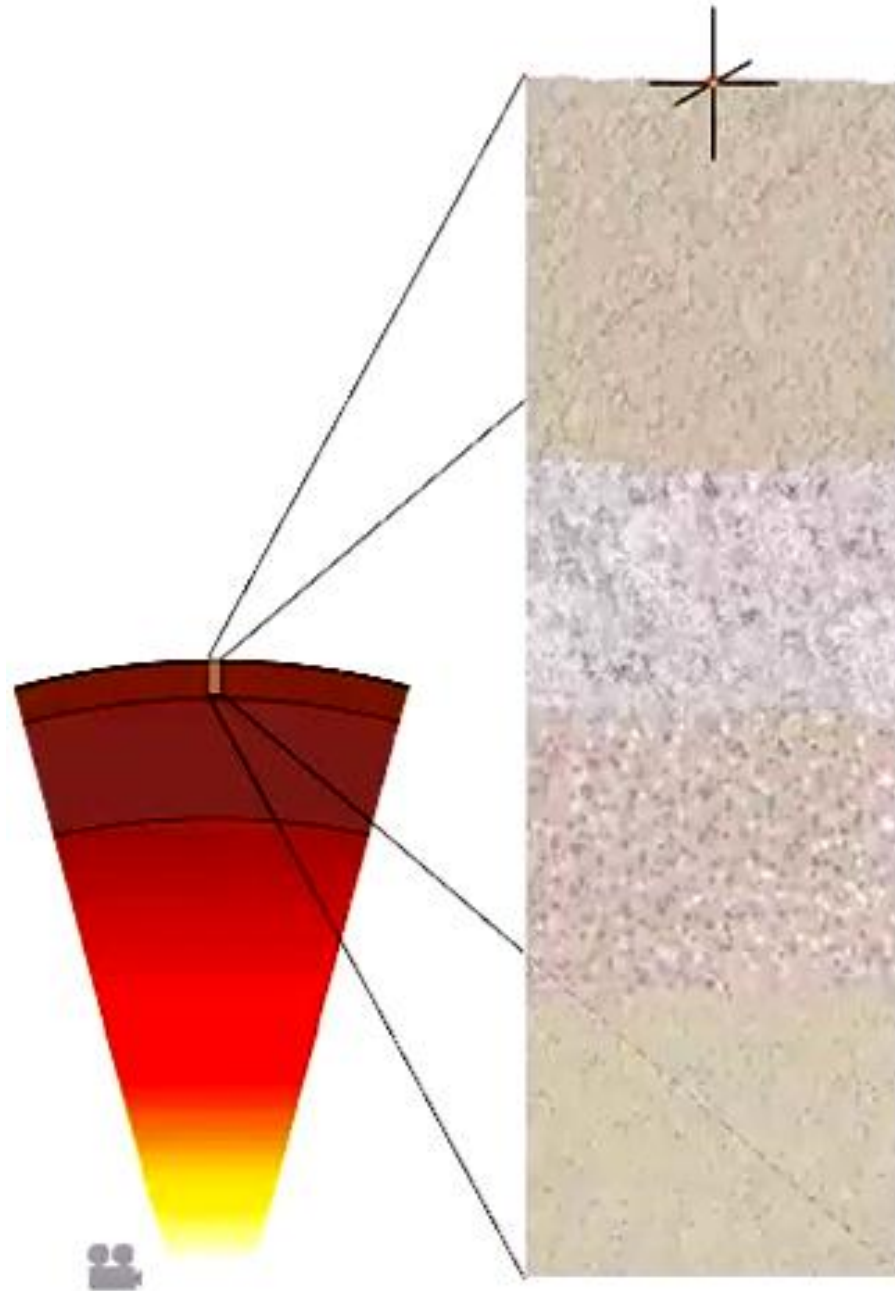
- Συνιστά ένα μοντέλο **επίπεδης παραμόρφωσης (plain strain)** όπου η παραμόρφωση γίνεται μόνο σε δύο άξονες, στον κατακόρυφο και ένα οριζόντιο.
- Η μέση οριζόντια τάση σ_h^* δίνεται από τον τύπο της διπλανής εικόνας. Συμμετέχουν δύο συνιστώσες, όπου:

- η **πρώτη αφορά στην αύξηση των τάσεων λόγω λέπτυνσης του φλοιού** και
- η **δεύτερη στη μεταβολή (μείωση) των τάσεων λόγω ισοστατικής επανόρθωσης.**

- Το μοντέλο αυτό δίνει **μικρότερες μεταβολές τάσεων**, κατά τη διάρκεια της **ανύψωσης** λόγω **λέπτυνσης** του φλοιού, από το **προηγούμενο μοντέλο** της **μονοαξονικής-παραμόρφωσης**.



- Ορισμοί και βασικά μεγέθη
- Καθεστώτ τάσης σε σημείο
- Μέση και αποκλίνουσα τάση
- Διάγραμμα και κύκλος του Mohr
- Καθεστώτα (τάσεων) αναφοράς
- Συνιστώσες καθεστώτων τάσεων
- Η θεωρία του Anderson για τη ρηγμάτωση
- Το κριτήριο θραύσης του Coulomb
- Κριτήρια Griffith και Von Mises

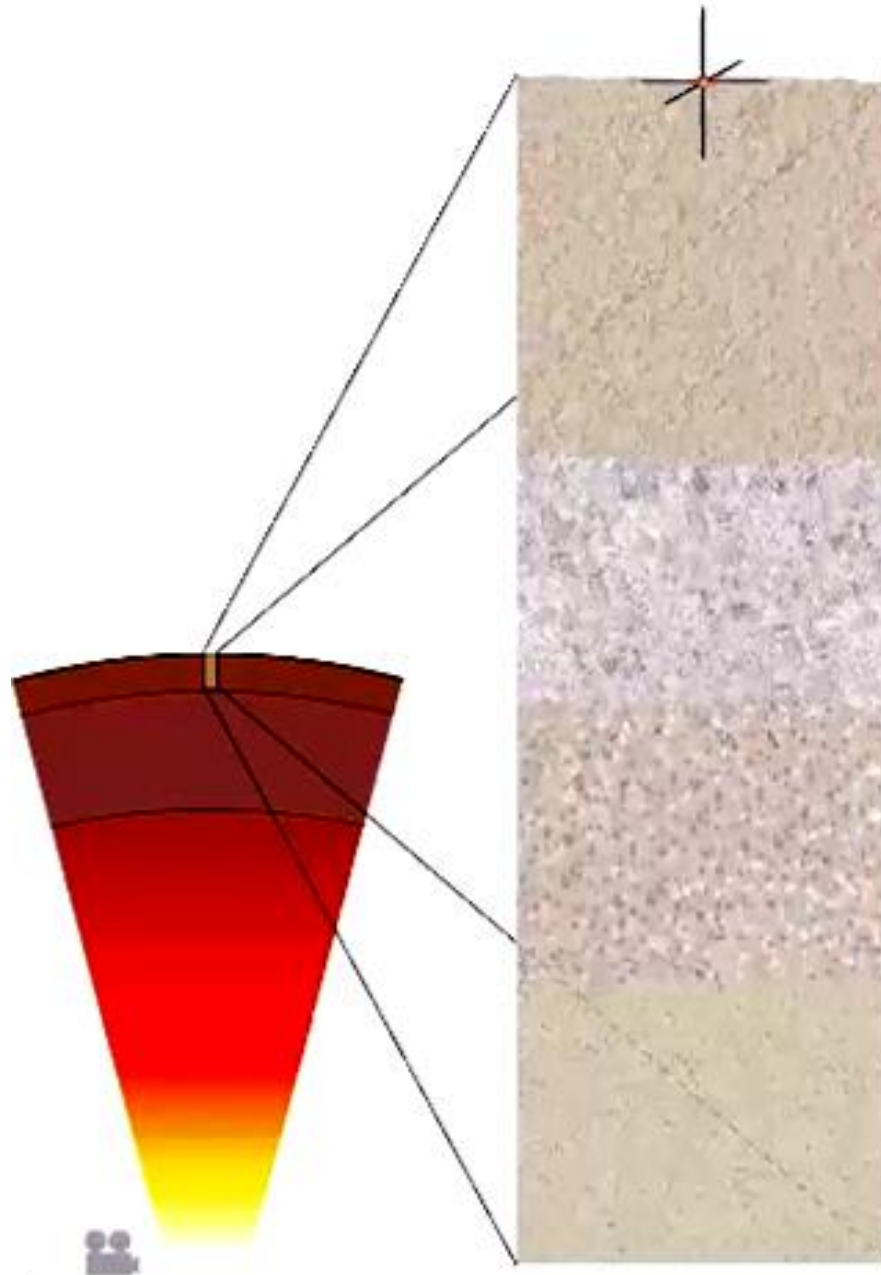


Καθεστώτα τάσεων στο φλοιό VS Βάθος

Κρατονικά τεμάχια και ασπίδες

- Τα πετρώματα του φλοιού στις περιοχές αυτές, που είναι **τεκτονικά ανενεργές** για δεκάδες ή και εκατοντάδες εκατομμύρια έτη, συμπεριφέρονται **σαν υγρά** (πολύ **χαμηλή διατμητική αντοχή**) κάτω από **χαμηλές τάσεις** και **χαμηλούς ρυθμούς παραμόρφωσης**.
- Το συνεπακόλουθο καθεστώτ τάσεων είναι **λιθοστατικό**, δηλ. το ελλειψοειδές τάσεων αντιστοιχεί σε **σφαίρα** ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ ή $\sigma_H = \sigma_h = \sigma_V$) και αυξάνει με το βάθος.

- Ορισμοί και βασικά μεγέθη
- Καθεστώτ τάσης σε σημείο
- Μέση και αποκλίνουσα τάση
- Διάγραμμα και κύκλος του Mohr
- Καθεστώτα (τάσεων) αναφοράς
- Συνιστώσες καθεστώτων τάσεων
- Η θεωρία του Anderson για τη ρηγμάτωση
- Το κριτήριο θραύσης του Coulomb
- Κριτήρια Griffith και Von Mises

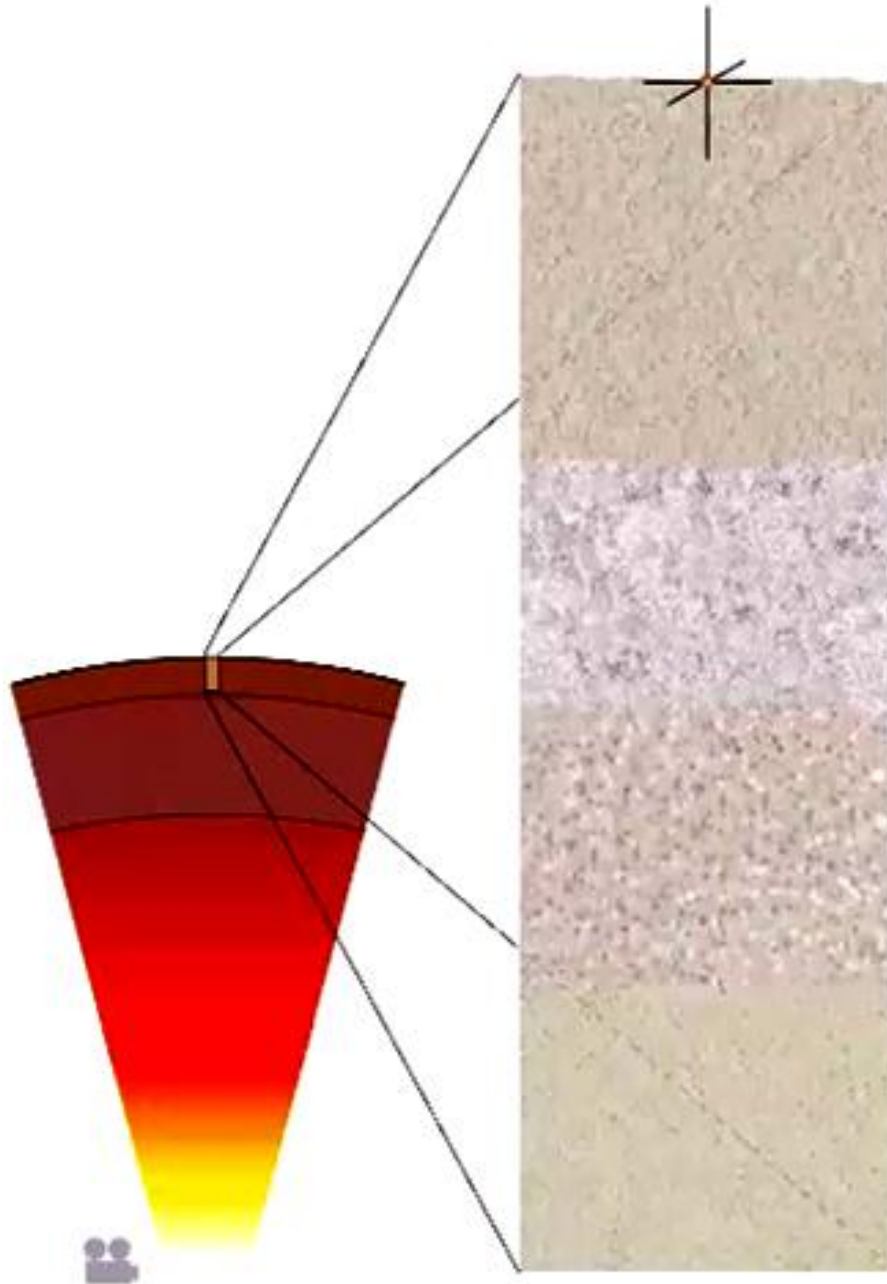


Καθεστώτα τάσεων στο φλοιό VS Βάθος

Εκτατικά καθεστώτα (Extensional regimes)

- Ο φλοιός της Γης στα εκτατικά καθεστώτα, χαρακτηρίζεται από **πραγματικά εφελκυστικές τάσεις** (αρνητικό πρόσημο) μόνο στα **100 πρώτα μέτρα** του φλοιού.
- Σε **βαθύτερα επίπεδα** οι τάσεις είναι **συμπιεστικές** σε όλες τις διευθύνσεις, αλλά οι **οριζόντιες τάσεις σ_2 & σ_3** είναι **μικρότερες** από την **κατακόρυφη σ_1** ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$).
- Οι τάσεις αυξάνονται με το βάθος, η αναλογία αυτή όμως παραμένει.

- ☐ Ορισμοί και βασικά μεγέθη
- ☐ Καθεστώτ τάσης σε σημείο
- ☐ Μέση και αποκλίνουσα τάση
- ☐ Διάγραμμα και κύκλος του Mohr
- ☐ Καθεστώτα (τάσεων) αναφοράς
- ☐ Συνιστώσες καθεστώτων τάσεων
- ☐ Η θεωρία του Anderson για τη ρηγμάτωση
- ☐ Το κριτήριο θραύσης του Coulomb
- ☐ Κριτήρια Griffith και Von Mises



Καθεστώτα τάσεων στο φλοιό VS Βάθος

Καθεστώτα βράχυνσης (Contractional regimes)

- Στα καθεστώτα βράχυνσης οι οριζόντιες τάσεις σ_1 & σ_2 είναι γενικά μεγαλύτερες από την κατακόρυφη τάση σ_3 ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$).

- ☐ Ορισμοί και βασικά μεγέθη
- ☐ Καθεστώς τάσης σε σημείο
- ☐ Μέση και αποκλίνουσα τάση
- ☐ Διάγραμμα και κύκλος του Mohr
- ☐ Καθεστώτα (τάσεων) αναφοράς
- ☐ Συνιστώσες καθεστώτων τάσεων
- ☐ Η θεωρία του Anderson για τη ρηγμάτωση
- ☐ Το κριτήριο θραύσης του Coulomb
- ☐ Κριτήρια Griffith και Von Mises

Τεκτονικές τάσεις (tectonic stress)

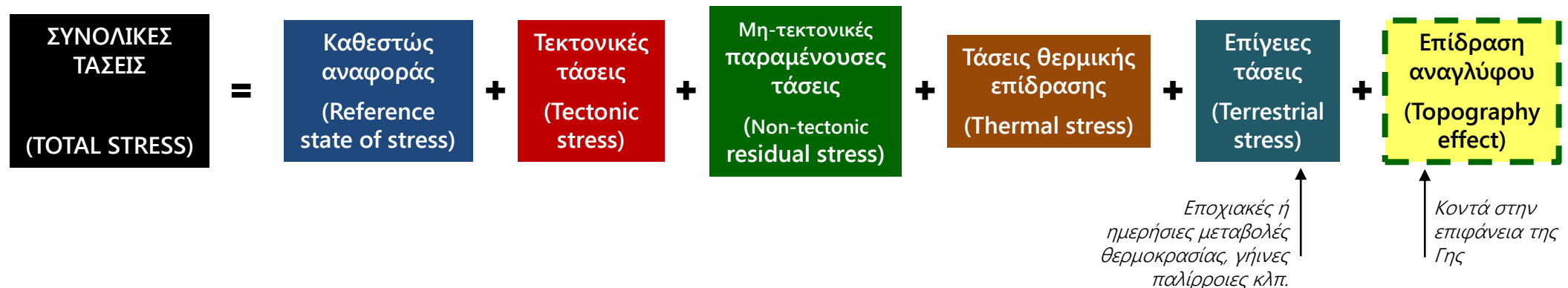
- Τα **μοντέλα αναφοράς** για τα καθεστώτα τάσεων που αναφέρθηκαν στα προηγούμενα εξαρτώνται από **φυσικές παραμέτρους**, όπως:
 - η **πυκνότητα** των πετρωμάτων
 - οι **συνθήκες** των **περιθωρίων** (μονοαξονική ή επίπεδη παραμόρφωση)
 - η επίδραση της **θερμότητας** και
 - οι **φυσικές ιδιότητες** των πετρωμάτων.
- Οι **αποκλίσεις** από τα καθεστώτα αναφοράς για τις τάσεις σε γενικές γραμμές οφείλονται στο καθεστώς των **τεκτονικών τάσεων (tectonic stress)**, που είναι αποτέλεσμα των τεκτονικών διεργασιών.
- Στη **μεγάλη κλίμακα** οι τεκτονικές τάσεις σχετίζονται με την κίνηση και την **τεκτονική των πλακών**.
- Σε **τοπικό επίπεδο** οι τεκτονικές τάσεις επηρεάζονται από πράγματα όπως π.χ. η **στρώση των πετρωμάτων** μπροστά από ένα επεκτεινόμενο ρήγμα, η **αλληλεπίδραση** ανάμεσα σε δύο αλληλοεπικαλυπτόμενα **ρήγματα** κλπ.
- Το **τοπικό καθεστώς** τεκτονικών τάσεων **μεταβάλλεται** σημαντικά σε σχέση με τις τοπικά επικρατούσες **γεωμετρικές** και προσανατολισμούς, ενώ το μεγάλης κλίμακας καθεστώς τεκτονικών τάσεων ("**περιοχικό**" **καθεστώς τεκτονικών τάσεων – regional tectonic stress**) συνήθως παραμένει **σταθερό** σε μεγάλης κλίμακας περιοχές.

Θερμική επίδραση στις οριζόντιες τάσεις (thermal effect on horizontal stress)

- Η **επίδραση της θερμοκρασίας** (αύξηση ή μείωση) στη **μεταβολή των οριζόντιων τάσεων (thermal effect on horizontal stress)** συχνά είναι σημαντική και πρέπει να προστίθεται στα τρία καθεστώτα αναφοράς που συζητήθηκαν στα προηγούμενα.
- Αυτό συμβαίνει γιατί τα πετρώματα συχνά είτε **θάβονται** βαθιά, είτε **ανυψώνονται** από μεγάλα βάρη, είτε εκτίθενται σε τοπικές πηγές θερμότητας, όπως **διεισδύσεις μαγματικών σωμάτων ή εκχύσεις λαβών**.
- Π.χ. η **ψύξη των πετρωμάτων** κατά την άνοδο και ανύψωσή τους δημιουργεί τις κατάλληλες **μεταβολές** στο **καθεστώς των τάσεων** ώστε να δημιουργηθούν **εκτατικές διαρρήξεις (διακλάσεις)**.

Παραμένουσες τάσεις (residual stress)

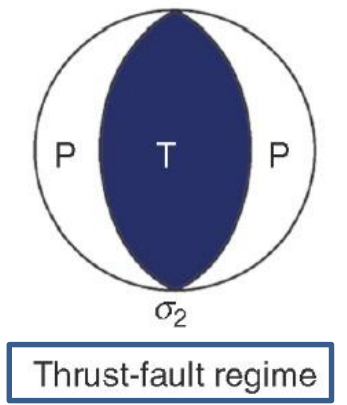
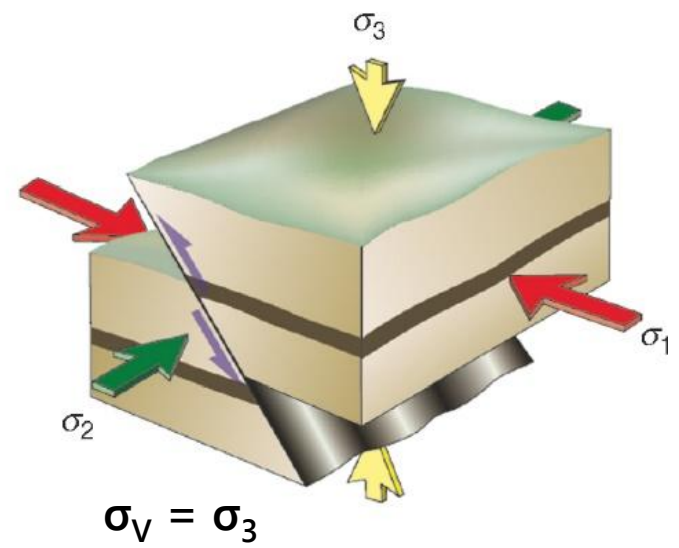
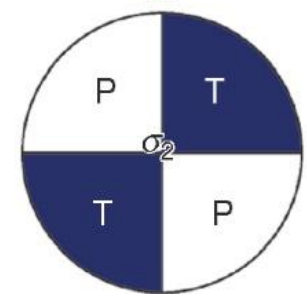
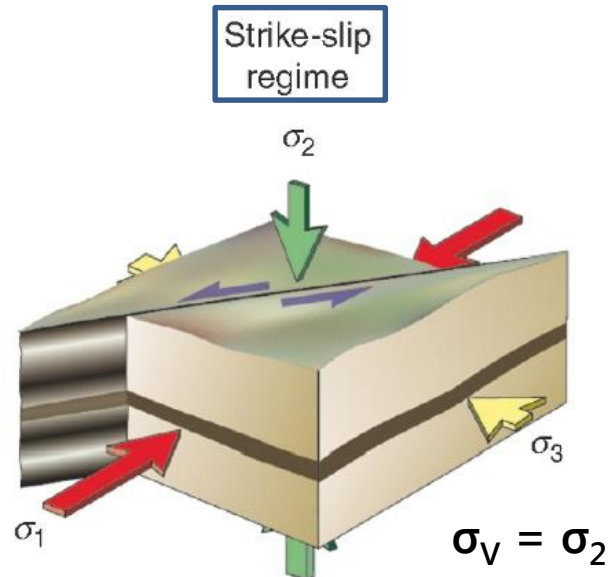
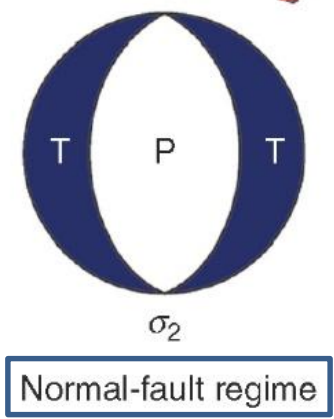
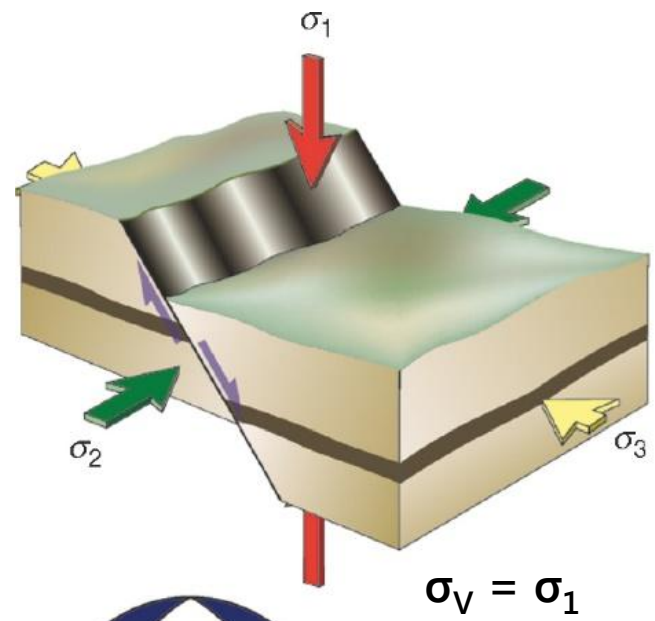
- Οι τάσεις μπορεί να **εγκλωβιστούν** και να **παραμείνουν** σε ένα πέτρωμα και μετά από την παύση της επίδρασης ή της μεταβολής της εξωτερικής δύναμης ή του πεδίου τάσεων.
- Οι τάσεις αυτές αναφέρονται ως **παραμένουσες τάσεις (residual stress)**.
- **Κάθε είδος** τάσεων μπορεί να εγκλωβιστεί σε ένα πέτρωμα (**τεκτονική τάση**, από **μεταβολή θερμοκρασίας**, από το **βάρος υπερκείμενων ιζημάτων** κλπ.).



- Ορισμοί και βασικά μεγέθη
- Καθεστώς τάσης σε σημείο
- Μέση και αποκλίνουσα τάση
- Διάγραμμα και κύκλος του Mohr
- Καθεστώτα (τάσεων) αναφοράς
- Συνιστώσες καθεστώτων τάσεων
- Η θεωρία του Anderson για τη ρηγμάτωση
- Το κριτήριο θραύσης του Coulomb
- Κριτήρια Griffith και Von Mises

- Με δεδομένο ότι στην **επιφάνεια** της Γης **δεν υφίστανται διατμητικές τάσεις**, μία από τις **κύριες τάσεις** πρέπει να είναι **κατακόρυφη**, άρα οι άλλες δύο οριζόντιες.
- Ανάλογα με το ποια είναι κατακόρυφη, τα τεκτονικά καθεστώτα ταξινομούνται όπως στο σχήμα:
- Αναφέρεται σε **ομοαξονικά πεδία παραμόρφωσης, χωρίς περιστροφή των αξόνων** και το παραμορφούμενο σώμα πρέπει να είναι **ισότροπο**.

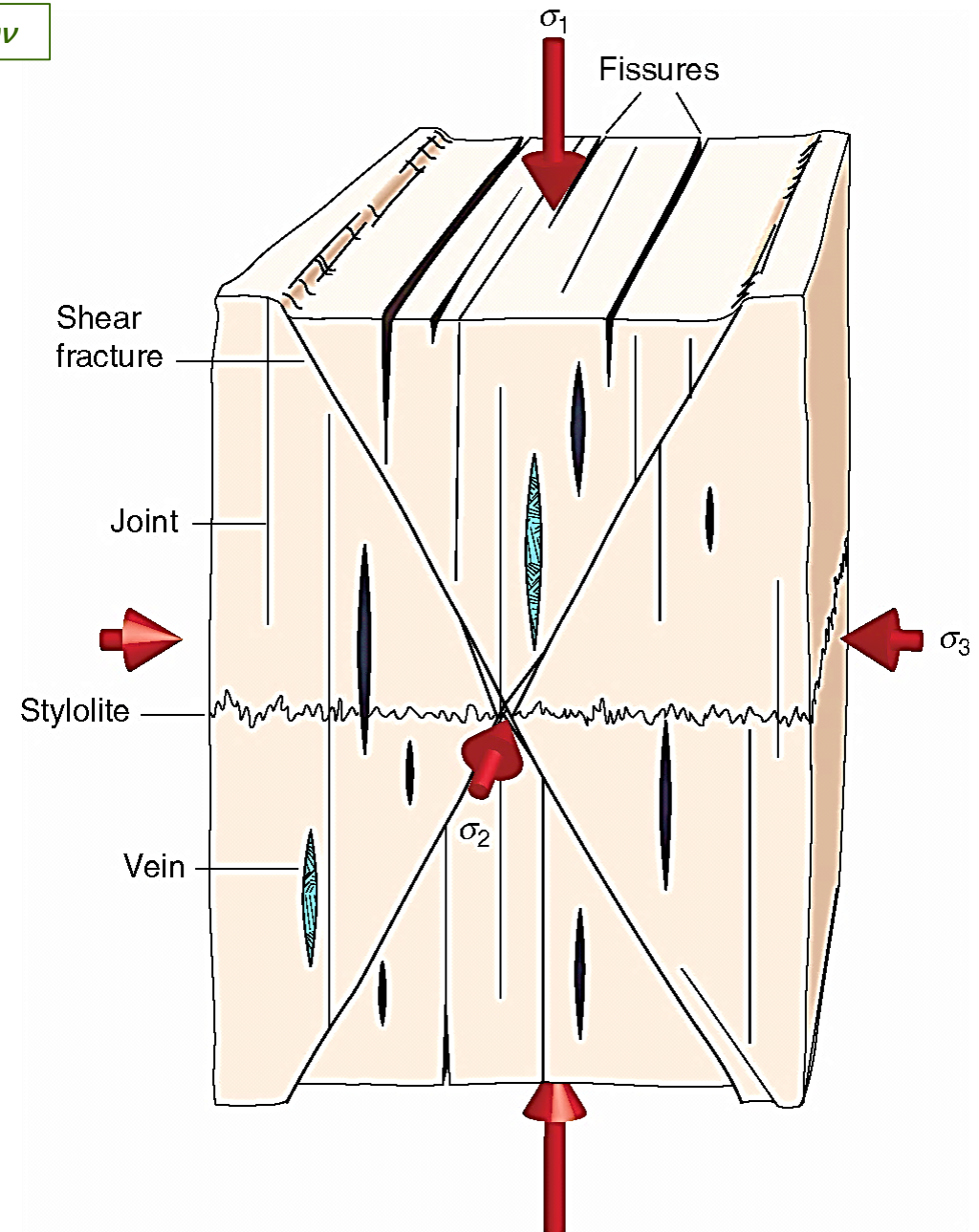
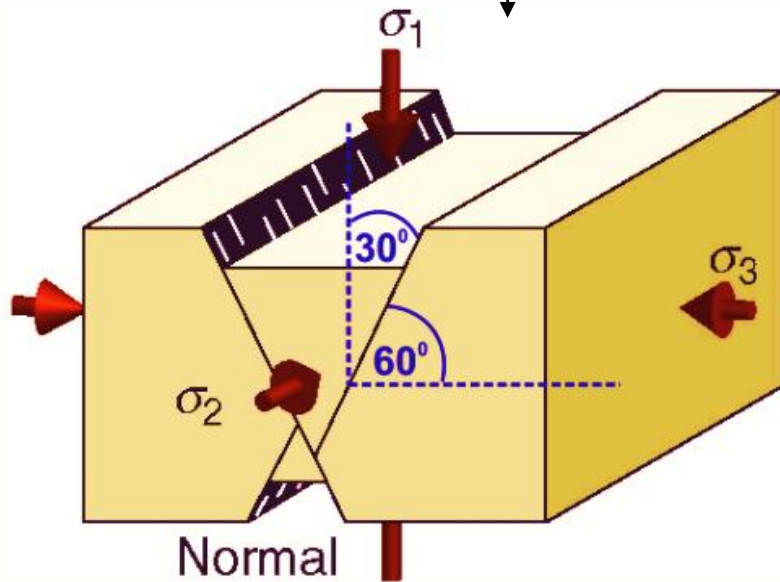
Ταξινόμηση καθεστώτων τεκτονικών τάσεων κατά Anderson



- Ορισμοί και βασικά μεγέθη
- Καθεστώτς τάσης σε σημείο
- Μέση και αποκλίνουσα τάση
- Διάγραμμα και κύκλος του Mohr
- Καθεστώτα (τάσεων) αναφοράς
- Συνιστώσες καθεστώτων τάσεων
- Η θεωρία του Anderson για τη ρηγμάτωση
- Το κριτήριο θραύσης του Coulomb
- Κριτήρια Griffith και Von Mises

Γεωμετρία των διαρρήξεων σε σχέση με τους άξονες των κυρίων τάσεων

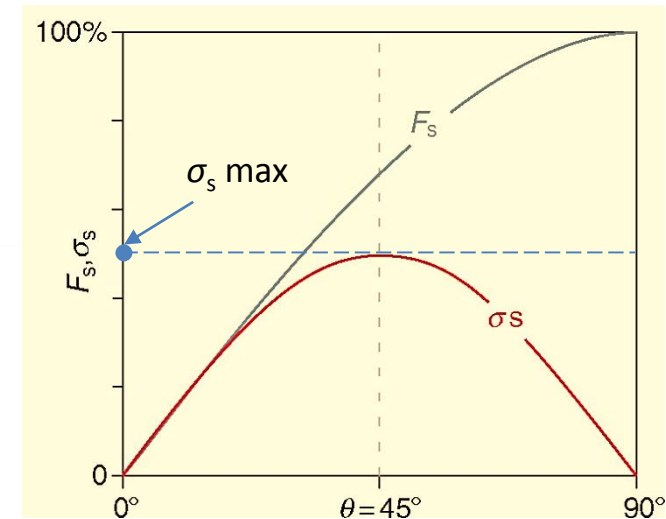
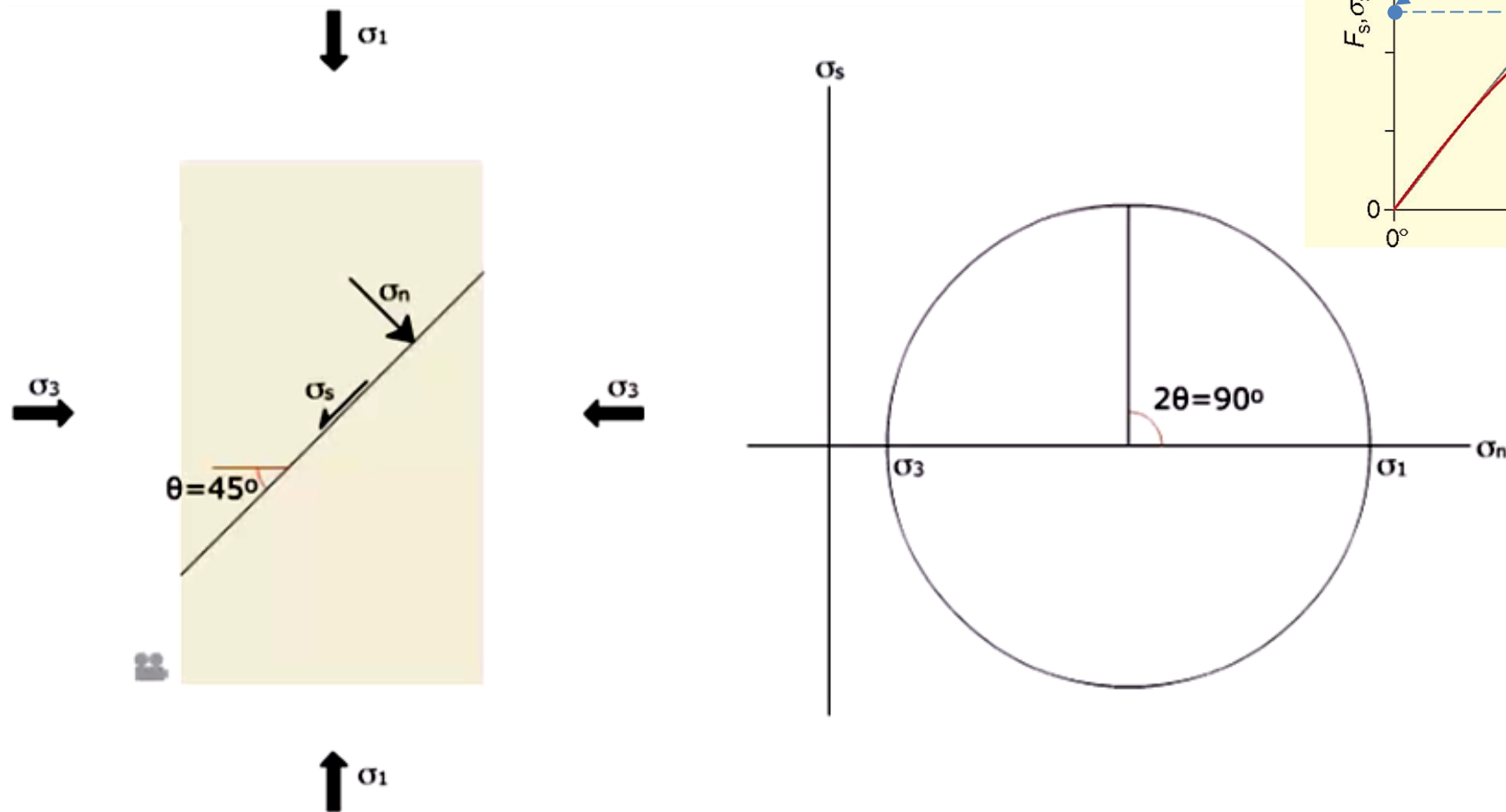
- Η θεωρία του Anderson για τη ρηγμάτωση καθιέρωσε τη γεωμετρική σχέση ανάμεσα στους άξονες των κυρίων τάσεων και τη γεωμετρία των διαρρήξεων τύπου I και τύπου II (mode I & mode II fractures).
- Οι εκτατικές (ή εφελκυστικές) διαρρήξεις (τύπου I), π.χ. διακλάσεις (joints), ρωγμές (fissures), φλέβες (veins), αναπτύσσονται παράλληλα με τον σ_1 και κάθετα στον σ_3 .
- Οι διατμητικές διαρρήξεις (shear fractures) σχηματίζουν γωνία $\approx 30^\circ$ με τον σ_1 και είναι παράλληλες με τον σ_2 .
- Στη διπλανή και κάτω εικόνα φαίνεται η σχέση αυτή για καθεστώτς κανονικών ρηγμάτων.



- Ορισμοί και βασικά μεγέθη
- Καθεστώτς τάσης σε σημείο
- Μέση και αποκλίνουσα τάση
- Διάγραμμα και κύκλος του Mohr
- Καθεστώτα (τάσεων) αναφοράς
- Συνιστώσες καθεστώτων τάσεων
- Η θεωρία του Anderson για τη ρηγμάτωση
- Το κριτήριο θραύσης του Coulomb
- Κριτήρια Griffith και Von Mises

- Ο **Anderson** ενσωμάτωσε στη θεωρία του την εργασία των **Navier και Coulomb**, οι οποίοι διαπίστωσαν ότι η **γωνία** με την οποία σχηματίζεται η **διατμητική διάρρηξη** δεν είναι 45° όπου, όπως αναφέρθηκε, η **διατμητική τάση** γίνεται **max**, αλλά ελέγχεται από το **λόγο** ανάμεσα στην **ορθή** και **διατμητική τάση**.
- Ο βέλτιστος λόγος σ_n / σ_s εξαρτάται από τη **γωνία εσωτερικής τριβής ϕ** και για τα περισσότερα πετρώματα εξασφαλίζεται όταν το επίπεδο της διάρρηξης έχει **κλίση** γύρω στις 60° . Στη γωνία αυτή η σ_n έχει μειωθεί αρκετά σε σχέση με τη γωνία των 45° , ενώ η σ_s έχει μειωθεί πολύ λιγότερο και παραμένει κοντά στη max τιμή.
- Η **γωνία εξαρτάται** επίσης από την **ολόπλευρη πίεση (confining pressure)**, που είναι άμεσα εξαρτώμενη από το βάθος που βρίσκεται "ενταφιασμένο" το πέτρωμα –burial depth) τη **θερμοκρασία** και την ύπαρξη **ρευστών** των πόρων.

Anderson και Coulomb

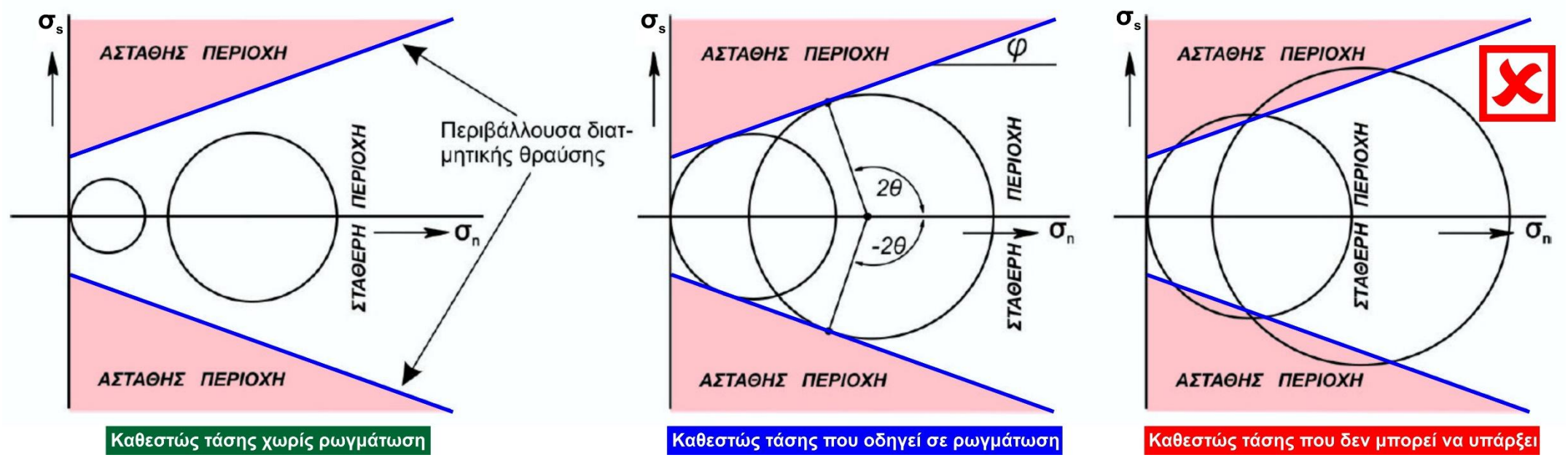


Περιβάλλουσα θραύσης και καθεστώς θραύσης

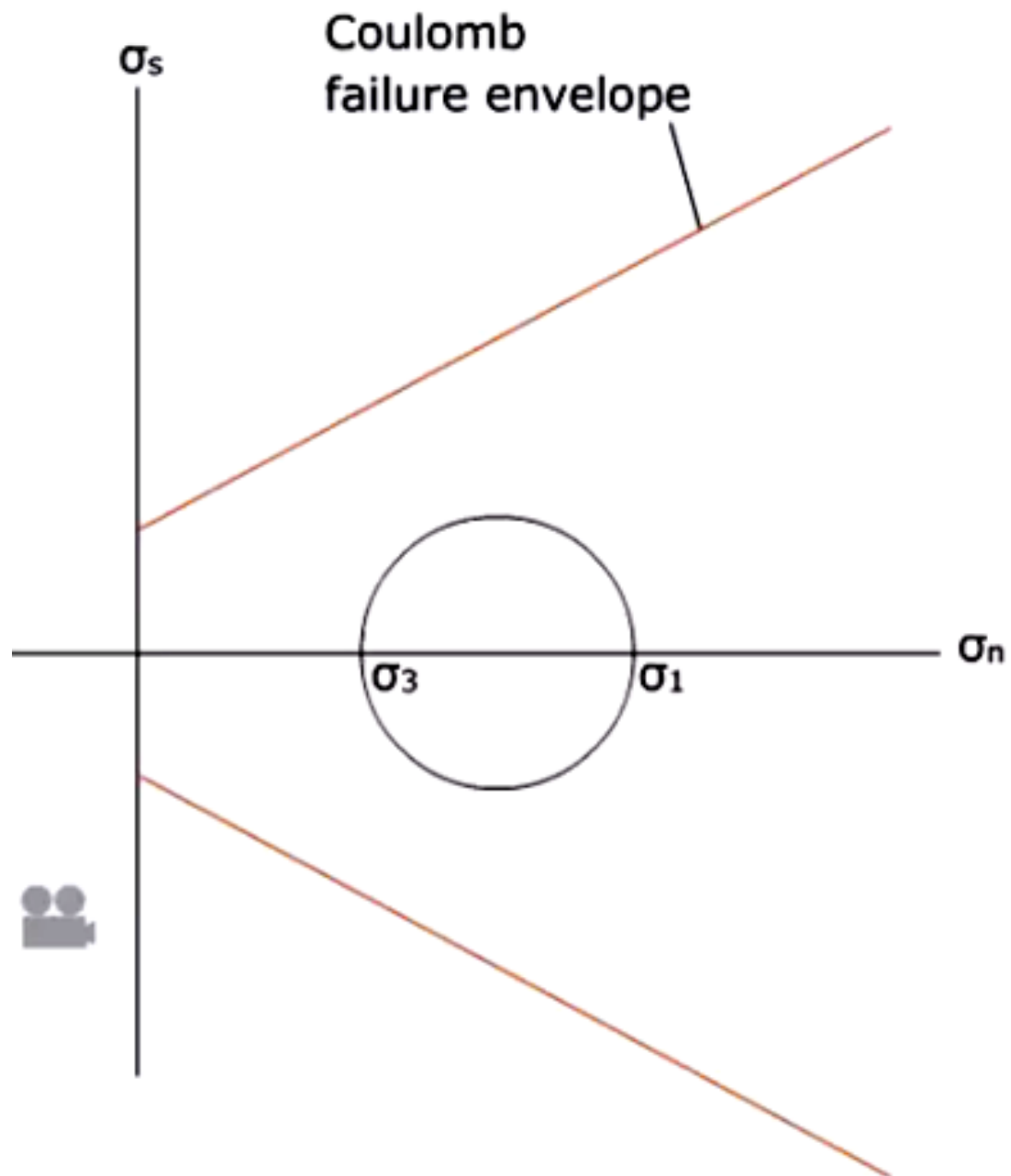
- Ορισμοί και βασικά μεγέθη
- Καθεστώς τάσης σε σημείο
- Μέση και αποκλίνουσα τάση
- Διάγραμμα και κύκλος του Mohr
- Καθεστώς (τάσεων) αναφοράς
- Συνιστώσες καθεστώςτων τάσεων
- Η θεωρία του Anderson για τη ρηγμάτωση
- Το κριτήριο θραύσης του Coulomb
- Κριτήρια Griffith και Von Mises

- Για ένα συγκεκριμένο πέτρωμα κάτω από **σταθερή θερμοκρασία** και θετική (συμπιεστική) **ολόπλευρη πίεση** (=συγκεκριμένο βάθος ενταφιασμού), η **δημιουργία διάρρηξης εξαρτάται** από τη **διαφορική τάση** ($\sigma_1 - \sigma_3$) καθώς και τη **μέση τάση** $[(\sigma_1 + \sigma_3) / 2]$.
- Αν **δεν υφίσταται** διαφορική τάση (differential stress), τότε το καθεστώς τάσεων είναι **λιθοστατικό**, στην ουσία δηλαδή δεν υφίσταται **καμία δύναμη** που να **ωθεί** ή να **έλκει** τον όγκο του πετρώματος σε **οποιαδήποτε διεύθυνση**, δεδομένου ότι αυτό δέχεται "ολόπλευρα" την ίδια πίεση.
- Η **διατμητική αντοχή** του πετρώματος **εξαρτάται** από την **ολόπλευρη πίεση**, δηλαδή από το βάθος που βρίσκεται, και συγκεκριμένα αυξάνει με αυτό.
- Δηλαδή όσο **μεγαλώνει το βάθος** χρειάζεται **μεγαλύτερη διαφορική τάση** για να προκληθεί διατμητική ρωγή στο πέτρωμα.

- Πειραματικά δεδομένα έχουν επιβεβαιώσει ότι σε δείγματα του ίδιου πετρώματος για την έναρξη της διάρρηξης απαιτείται μια **συγκεκριμένη διαφορική τάση** $\sigma_1 - \sigma_3$ και ότι το **μέγεθος** της απαιτούμενης διαφορικής τάσης **μεγαλώνει** όσο **μεγαλώνει** η **ολόπλευρη πίεση** σ_3 .
- Πειραματικά δεδομένα δείχνουν επίσης ότι στο διάγραμμα Mohr μπορούμε να φτιάξουμε μια **περιβάλλουσα διατμητικής θραύσης**, που αντιπροσωπεύεται από δύο **συμμετρικές γραμμές** εκατέρωθεν του οριζόντιου άξονα.
- Κάθε κύκλος Mohr που **περιέχεται** μεταξύ των δύο αυτών γραμμών, αντιπροσωπεύει ένα **σταθερό καθεστώς** τάσης που δεν οδηγεί το πέτρωμα σε θραύση.
- Κάθε κύκλος που **εφάπτεται** στις δύο αυτές γραμμές αντιπροσωπεύει ένα **κρίσιμο καθεστώς** τάσης που προκαλεί αστοχία στο πέτρωμα (διατμητική διάρρηξη).
- Κάθε κύκλος που **τέμνει** τις δύο αυτές γραμμές αντιπροσωπεύει ένα **ασταθές καθεστώς** (που δεν μπορεί να υπάρξει), δεδομένου ότι θα έχει προηγηθεί η θραύση.



- Ορισμοί και βασικά μεγέθη
- Καθεστώς τάσης σε σημείο
- Μέση και αποκλίνουσα τάση
- Διάγραμμα και κύκλος του Mohr
- Καθεστώτα (τάσεων) αναφοράς
- Συνιστώσες καθεστώτων τάσεων
- Η θεωρία του Anderson για τη ρηγμάτωση
- Το κριτήριο θραύσης του Coulomb
- Κριτήρια Griffith και Von Mises

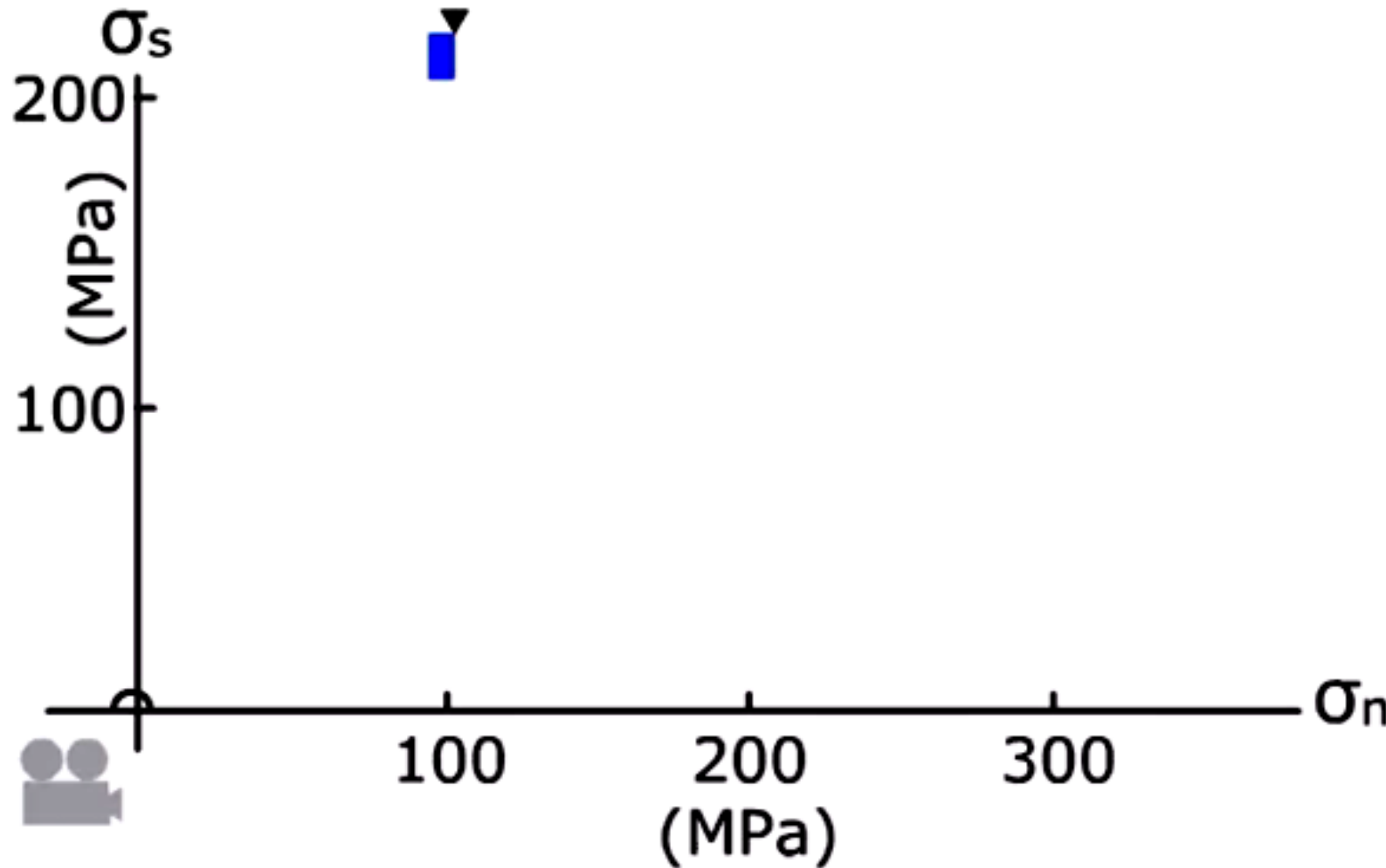


..... με άλλα λόγια (animation)



- Ορισμοί και βασικά μεγέθη
- Καθεστώς τάσης σε σημείο
- Μέση και αποκλίνουσα τάση
- Διάγραμμα και κύκλος του Mohr
- Καθεστώτα (τάσεων) αναφοράς
- Συνιστώσες καθεστώτων τάσεων
- Η θεωρία του Anderson για τη ρηγμάτωση
- Το κριτήριο θραύσης του Coulomb
- Κριτήρια Griffith και Von Mises

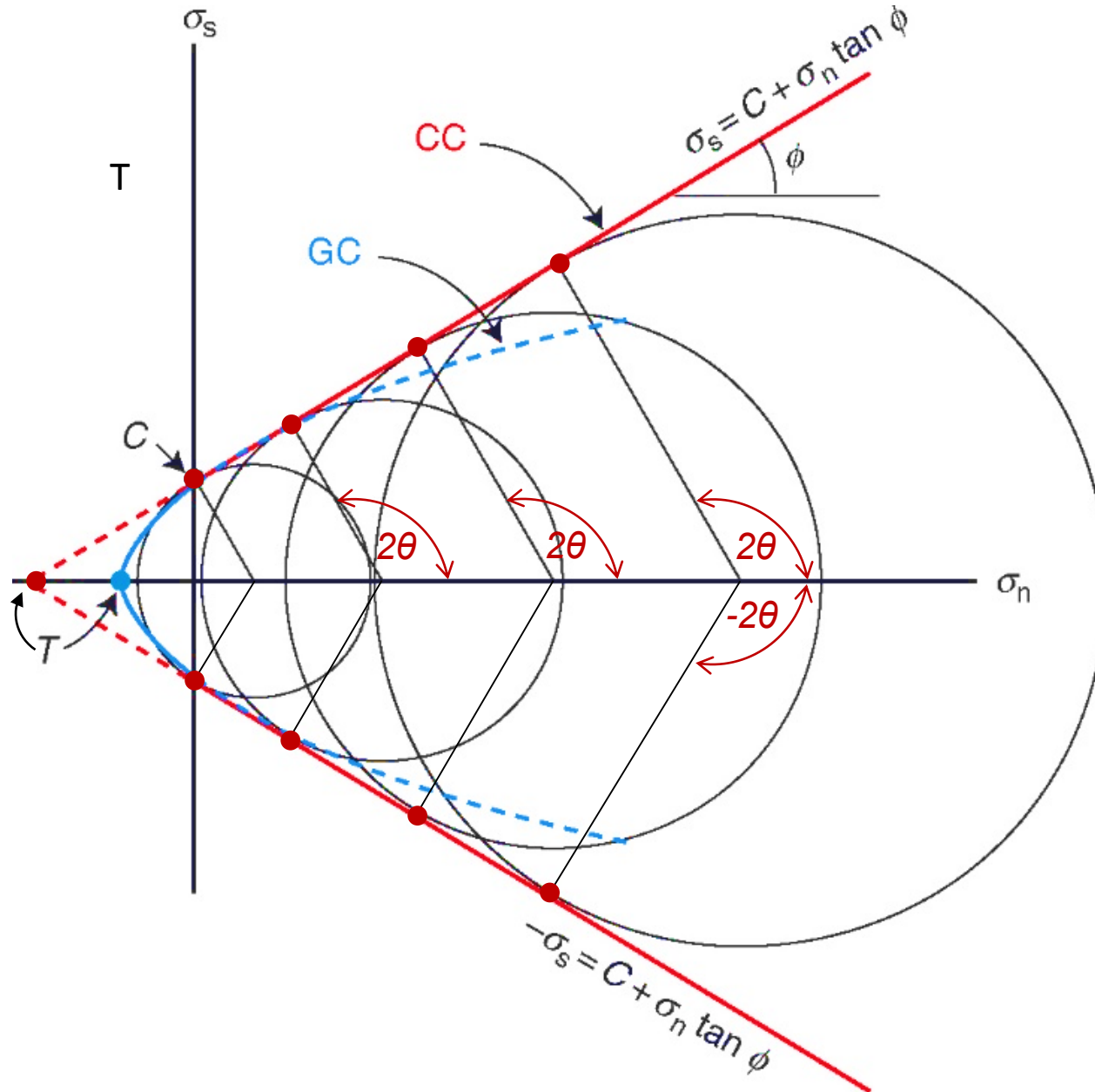
Color scale shows increase in confining pressure



Κατασκευή περιβάλλουσας θραύσης

- Πειραματικά η περιβάλλουσα θραύσης (failure envelope) μπορεί να προσδιορισθεί με **τριαξονική δοκιμή θλίψης (triaxial compression test)**, μεταβάλλοντας σε κάθε δοκιμή την ολόπλευρη πίεση (confining pressure), που αντιστοιχεί στο σ_3 , και αυξάνοντας τη διαφορική τάση (differential stress) $\sigma_1 - \sigma_3$ (δηλαδή αυξάνοντας το σ_1), μέχρι να δημιουργηθεί η διατμητική διάρρηξη.
- Είναι προφανές ότι οι ευθείες γραμμές της περιβάλλουσας θραύσης, είναι σε πολλές περιπτώσεις "κατά προσέγγιση ευθείες" που αποκλίνουν από το κριτήριο του Coulomb.

- Ορισμοί και βασικά μεγέθη
- Καθεστώς τάσης σε σημείο
- Μέση και αποκλίνουσα τάση
- Διάγραμμα και κύκλος του Mohr
- Καθεστώτα (τάσεων) αναφοράς
- Συνιστώσες καθεστώτων τάσεων
- Η θεωρία του Anderson για τη ρηγμάτωση
- Το κριτήριο θραύσης του Coulomb
- Κριτήρια Griffith και Von Mises



Κριτήριο θραύσης Coulomb

- Οι κατά προσέγγιση ευθείες γραμμές της περιβάλλουσας θραύσης περιγράφονται από τη σχέση:

$$\sigma_s = C + \sigma_n \epsilon\phi$$
 - σ_s η κρίσιμη διατμητική τάση πάνω στη διάρρηξη την ώρα της θραύσης,
 - σ_n η ορθή τάση στη διάρρηξη,
 - C η συνοχή του πετρώματος, δηλ. η διατμητική αντοχή του κατά μήκος επιπέδου όπου $\sigma_n=0$,
 - ϕ η γωνία εσωτερικής τριβής.
- Η $\epsilon\phi$ καλείται και **συντελεστής εσωτερικής τριβής** και συμβολίζεται με το γράμμα μ . Για την άμμο κυμαίνεται γύρω στο 0,58 ($\phi = 30^\circ$). Για τα συμπαγή πετρώματα κυμαίνεται από 0,47 – 0,7. Σε γενικούς υπολογισμούς χρησιμοποιείται το 0,6.
- Το C αντιπροσωπεύει τη **διατομή της περιβάλλουσας με τον κατακόρυφο άξονα** (όπου $\sigma_n=0$).
- Στο σημείο T που αντιπροσωπεύει τη **διατομή με τον οριζόντιο άξονα** η $\sigma_s=0$. Έχω μόνο ορθή εφελκυστική τάση (άρα εφελκυστικές διαρρήξεις $\perp \sigma_3$).
- Γενικά οι παράμετροι C , T & ϕ μεταβάλλονται **ανάλογα** με το **πέτρωμα**. Π.χ. για τους ψαμμίτες, αυξάνουν όσο αυξάνει ο βαθμός λιθοποίησης του πετρώματος.
- Για κάθε κρίσιμο καθεστώς τάσης το κριτήριο θραύσης του Coulomb ικανοποιείται στα **δύο αντιδιαμετρικά σημεία** που ο κύκλος εφάπτεται στην περιβάλλουσα θραύσης.
- Τα σημεία αυτά ορίζουν τις κρίσιμες ορθές και διατμητικές τάσεις που ασκούνται σε δύο **συμμετρικά επίπεδα** με διαφορετικό προσανατολισμό που θα εκδηλωθεί η αστοχία (διατμητική διάρρηξη) και καλούνται **συζυγή διατμητικά επίπεδα (conjugate shear planes)**.
- Με την παραδοχή ότι η **περιβάλλουσα είναι ευθείες γραμμές**, τότε οι **γωνίες 2θ** , όλων των κρίσιμων σημείων θα είναι **ίσες**.

- Ορισμοί και βασικά μεγέθη
- Καθεστώς τάσης σε σημείο
- Μέση και αποκλίνουσα τάση
- Διάγραμμα και κύκλος του Mohr
- Καθεστώτα (τάσεων) αναφοράς
- Συνιστώσες καθεστώτων τάσεων
- Η θεωρία του Anderson για τη ρηγμάτωση
- Το κριτήριο θραύσης του Coulomb
- Κριτήρια Griffith και Von Mises

- Το κριτήριο του Coulomb δεν μπορεί να υπολογίσει τον **προσανατολισμό** των **διατμητικών επιπέδων**, σε σχέση με τους κύριους άξονες $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, που θα εκδηλωθεί η διάρρηξη.
- Αυτό όμως μπορεί να γίνει από το διάγραμμα του κύκλου του Mohr και την περιβάλλουσα θραύσης.
- Στο διπλανό σχήμα δίνεται ένα παράδειγμα με την προϋπόθεση ότι ο σ_1 είναι κατακόρυφος (και οι σ_2, σ_3 οριζόντιοι). Οι τύποι όμως που αναφέρονται ισχύουν για κάθε προσανατολισμό του σ_1 .

• Αποδεικνύεται ότι:

$$2\theta = 90^\circ + \phi$$

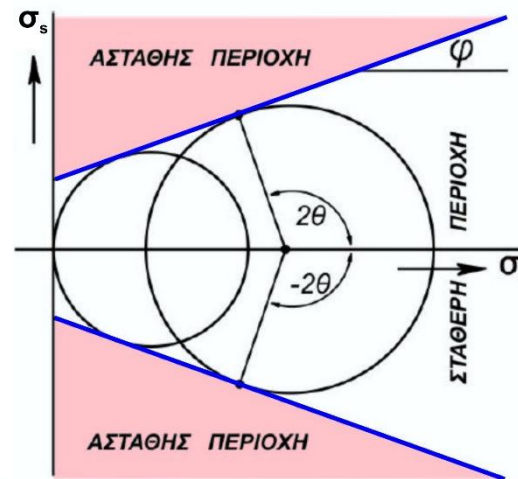
- και αν α είναι η γωνία που σχηματίζει το **επίπεδο** με τον σ_1 , και με δεδομένο ότι $\alpha = 90^\circ - \theta$, τότε:

$$\alpha = (90^\circ - \phi) / 2$$

- Έτσι λοιπόν η περιβάλλουσα θραύσης προσδιορίζει, εκτός από τα κρίσιμα καθεστώτα τάσης που οδηγούν σε θραύση, και τον **προσανατολισμό** των **διαρρήξεων** που θα δημιουργηθούν, **σε σχέση με τον σ_1** .
- Υπενθυμίζεται ότι στην περίπτωση που ο σ_1 είναι κατακόρυφος η **γωνία θ** αντιπροσωπεύει και την **κλίση του επιπέδου**.
- Για τα περισσότερα πετρώματα η γωνία εσωτερικής τριβής, έχει τιμές που δίνουν:

$$\theta = \pm 60^\circ \text{ \& }$$

$$\alpha = \pm 30^\circ.$$

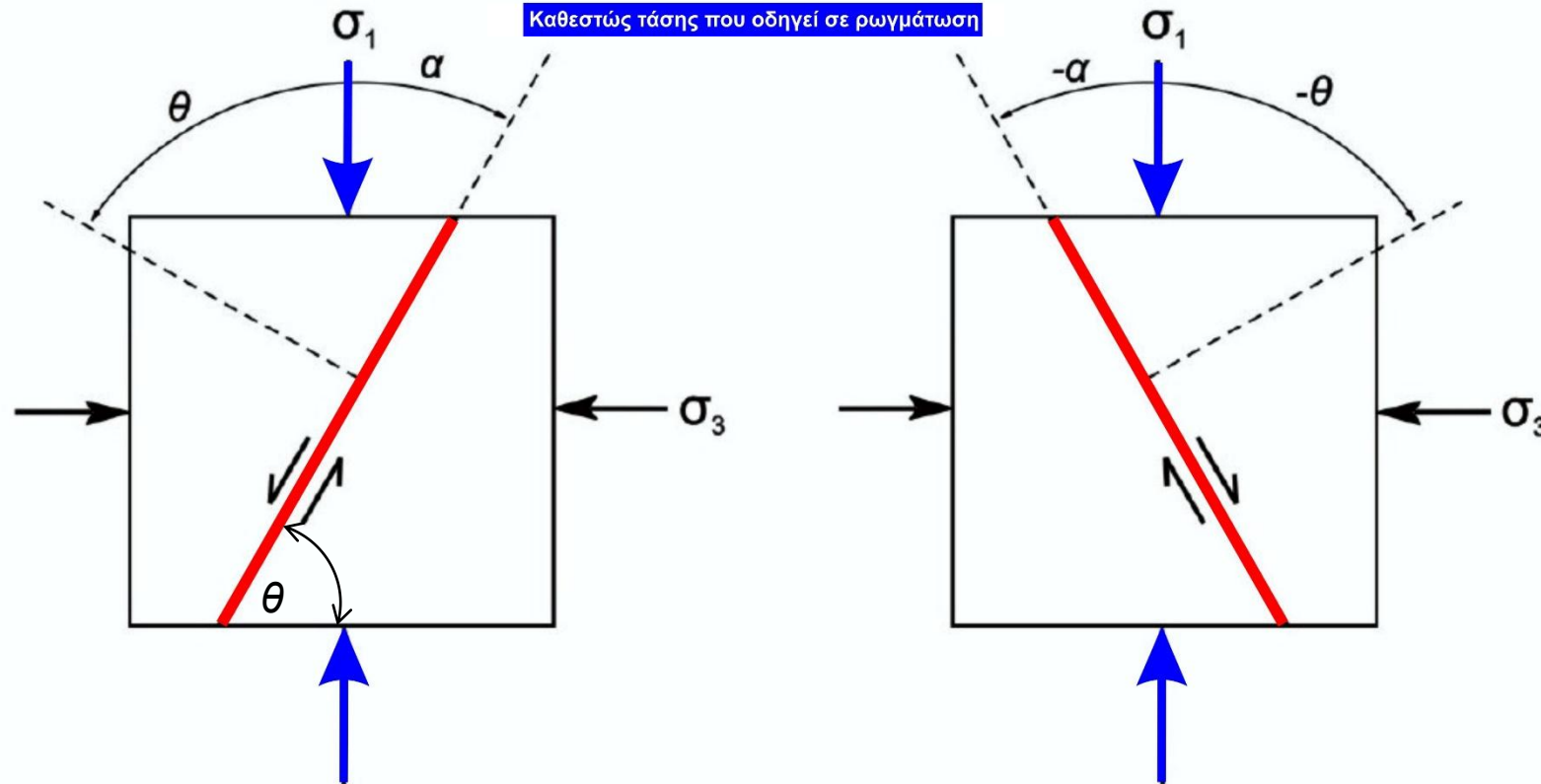


Γωνίες, κλίσεις, προσανατολισμοί

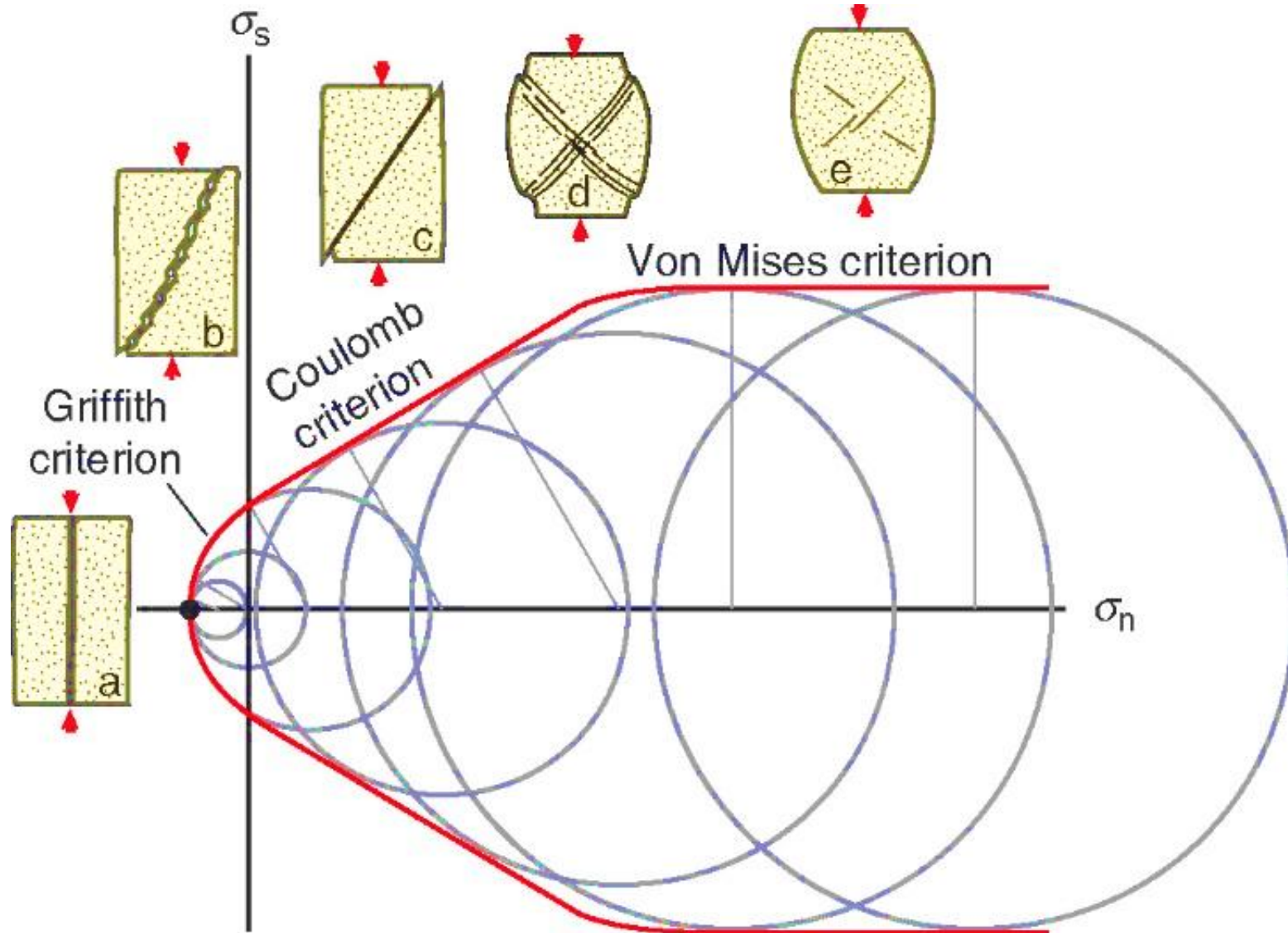
ΘΥΜΑΜΑΙ ΟΤΙ:

θ η γωνία που σχηματίζει η κάθετος στο επίπεδο με τον σ_1 .

Καθεστώς τάσης που οδηγεί σε ρωγμάτωση



- Ορισμοί και βασικά μεγέθη
- Καθεστώς τάσης σε σημείο
- Μέση και αποκλίνουσα τάση
- Διάγραμμα και κύκλος του Mohr
- Καθεστώτα (τάσεων) αναφοράς
- Συνιστώσες καθεστώτων τάσεων
- Η θεωρία του Anderson για τη ρηγμάτωση
- Το κριτήριο θραύσης του Coulomb
- Κριτήρια Griffith και Von Mises



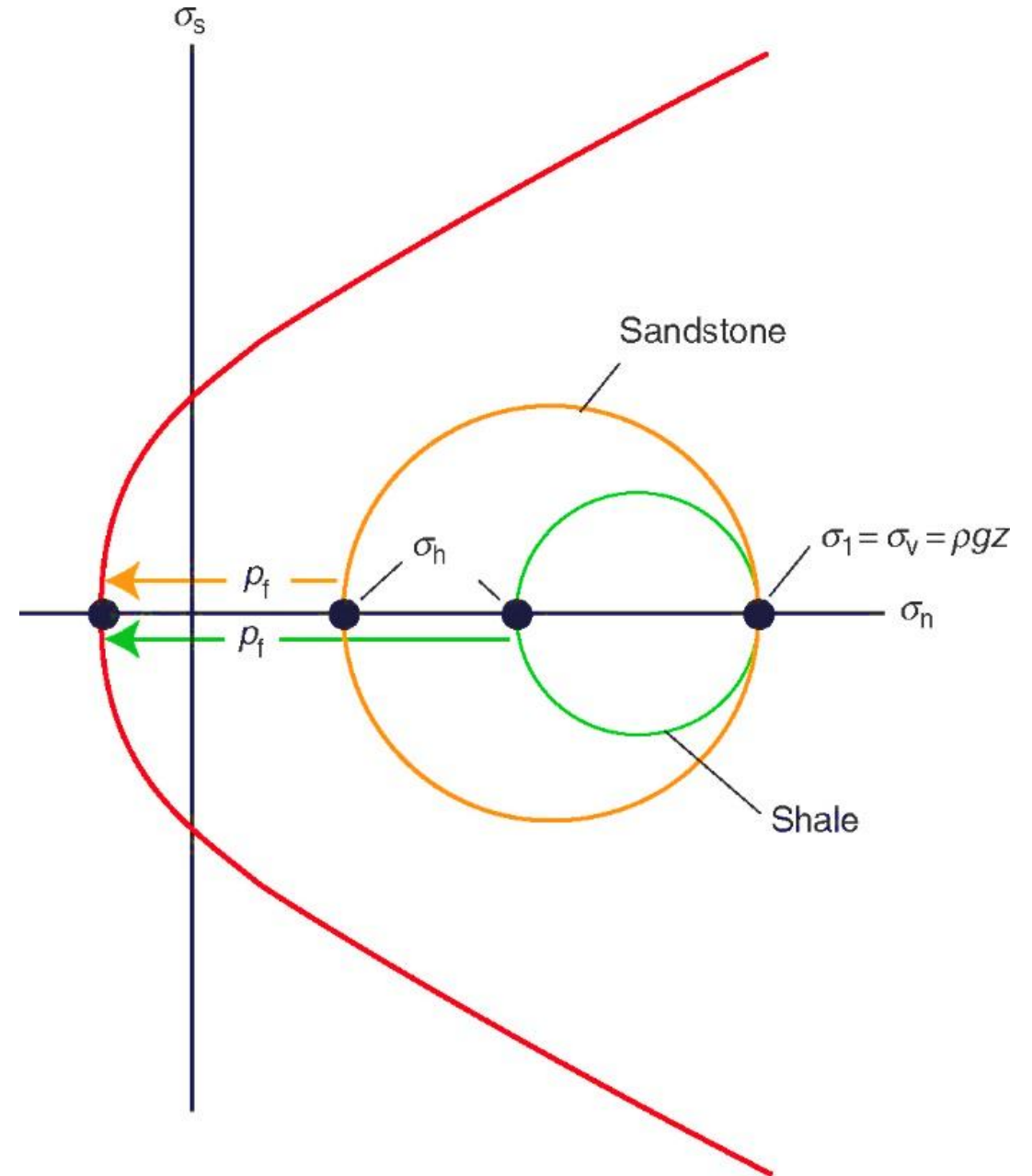
- Το κριτήριο του Coulomb δεν μπορεί να καλύψει το σύνολο των περιπτώσεων. Για παράδειγμα δίνει **μεγάλες αποκλίσεις** στο **εφελκυστικό πεδίο** (εκτατική, δηλ. αρνητική, ορθή τάση, μικρές τιμές ολόπλευρης πίεσης), όπου προτιμάται το **κριτήριο του Griffith**.
- Σημαντικές **αποκλίσεις** παρουσιάζονται και στην περίπτωση που περνάμε στο πεδίο της **όλκιμης (ductile)** και **πλαστικής παραμόρφωσης** σε μεγαλύτερα βάθη. Τα πεδία αυτά προσεγγίζονται με το **κριτήριο της σταθερής διατμητικής τάσης** (η περιβάλλουσα είναι οριζόντιες γραμμές), γνωστό και ως **κριτήριο Von Mises**.
- Οι διάφοροι τύποι διαρρήξεων που δημιουργούνται σε κάθε περίπτωση είναι:
 - a. **εφελκυστικές διαρρήξεις (tensile fractures),**
 - b. **υβριδικές διαρρήξεις (hybrid or mixed-mode fractures),** συνδυασμός mode I & mode II διαρρήξεων,
 - c. **διατμητικές διαρρήξεις (shear fractures)**
 - d. **semi-ductile shear-bands**
 - e. **πλαστική παραμόρφωση.**

- Ορισμοί και βασικά μεγέθη
- Καθεστώς τάσης σε σημείο
- Μέση και αποκλίνουσα τάση
- Διάγραμμα και κύκλος του Mohr
- Καθεστώτα (τάσεων) αναφοράς
- Συνιστώσες καθεστώτων τάσεων
- Η θεωρία του Anderson για τη ρηγμάτωση
- Το κριτήριο θραύσης του Coulomb
- Κριτήρια Griffith και Von Mises

- Τα πετρώματα συχνά έχουν **πορώδες** και αυτό είναι γεμάτο με υγρά (**νερό, πετρέλαιο ...**).
- Η **πίεση των ρευστών των πόρων P** δρα **ανταγωνιστικά** με τη **συνολική τάση** που ασκείται στο πέτρωμα (σ_{tot}) και για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται ο όρος **ενεργή τάση (effective stress)** που δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_{eff} = \sigma_{tot} - P$$

- Υπενθυμίζεται ότι η σ_{tot} περιγράφεται από το **ελλειψοειδές τάσεων** ή τον **τανυστή τάσεων**.
- Όταν η **πίεση των ρευστών των πόρων είναι 0**, τότε $\sigma_{eff} = \sigma_{tot}$. Συμβαίνει κυρίως σε πετρώματα με ελάχιστο ή καθόλου πορώδες (π.χ. τα κρυσταλλικά πετρώματα όπως **γνεύσιοι, γρανίτες** κλπ.).
- Η **αύξηση της πίεσης των πόρων μετακινεί τον κύκλο του Mohr** προς τα **αριστερά** στο διάγραμμα.
- Το **μέγεθος του κύκλου δεν αλλάζει**, δεδομένου ότι η πίεση των ρευστών ενεργεί ισόποσα προς όλες τις διευθύνσεις και άρα η πίεση των πόρων μειώνει τις κύριες τάσεις κατά αντίστοιχα ποσά.
- **Αστοχία (θραύση)** θα πραγματοποιηθεί όταν ο κύκλος **αγγίξει** την **περιβάλλουσα θραύσης**.
- Αν αυτό γίνει στο **συμπιεστικό πεδίο** θα δημιουργηθούν **διατμητικές διαρρήξεις**, ενώ αν γίνει στο **εφελκυστικό ανοικτές (εφελκυστικές) διαρρήξεις**.
- Ένας ψαμμίτης π.χ. μπορεί να "αντέξει" μεγαλύτερες διαφορικές τάσεις από έναν αργιλικό σχίστη. Άρα χρειάζεται πολύ μικρότερη αύξηση της πίεσης των πόρων (απ' ότι ο αργιλικός σχίστης), ώστε μετακινούμενος ο κύκλος Mohr προς τα αριστερά, να "αγγίξει" την περιβάλλουσα θραύσης, στο εφελκυστικό πεδίο στην περίπτωση του διπλανού σχήματος, ώστε να δημιουργηθούν διακλάσεις (ανοικτές διαρρήξεις).



Τέλος

Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Σημειώματα

Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την έκδοση 1.0.

Έχουν προηγηθεί οι κάτωθι εκδόσεις:

- Έκδοση διαθέσιμη εδώ <http://eclass.uoa.gr/courses/GEOL135/>



Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Εθνικών και Καποδιστριακών Πανεπιστημίων Αθηνών, Δημήτριος Παπανικολάου, Στυλιανός Λόζιος 2015. Δημήτριος Παπανικολάου, Στυλιανός Λόζιος. «Τεκτονική Γεωλογία. Ενότητα 2: Δυνάμεις και Τάσεις». Έκδοση: 1.0. Αθήνα 2015. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση:
<http://opencourses.uoa.gr/courses/GEOL4>.



Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.



Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.



Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (1/8)

Το Έργο αυτό κάνει χρήση των ακόλουθων έργων:

Εικόνες/Σχήματα/Διαγράμματα/Φωτογραφίες

Εικόνα 1, Διαφάνεια 2: Tectonic regime and compressive strike slip. Copyrighted.

<http://homepage.ufp.pt/biblioteca/BasPrincTectonics/WebBasPrincTectonics/images/Fig.585-TectonicRegime.jpg>

<http://homepage.ufp.pt/biblioteca/WebBasPrinTectonics/images/Fig.517-StrikeSlip.jpg>

Εικόνα 2, Διαφάνεια 4: Graphic from P.L. Heller, 1995. Copyrighted.

<http://pages.uoregon.edu/rdorsey/Basin.GIF2>

Εικόνα 3, Διαφάνεια 4: Seismic waves diagram when an earthquake occurs.

Copyrighted. <http://searchengineland.com/figz/wp-content/seloads/2013/01/earthquake.png>



Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (2/8)

Εικόνα 4, Διαφάνεια 4: After a 2010 earthquake in Baja, the stress along the slipped fault decreased, while the stress at the locked ends increased. Image credit Ross Stein (USGS)/Shinji Toda (Kyoto University). Copyrighted.

<https://i.kinja-img.com/gawker-media/image/upload/ua8eivo51ba59hz0ehte.png>

Εικόνα 5, Διαφάνεια 5: Οι νόμοι του Νεύτωνα. Copyrighted.

<http://folk.uib.no/nglhe/e-modules/Chapter%204%20and%205/4-5%20Stress.swf>

Εικόνα 6, Διαφάνεια 6: Graphic. Copyrighted.

Εικόνες 7-8, Διαφάνεια 7: Copyrighted.

Εικόνα 9, Διαφάνεια 9: Relative age relationship of sedimentary and igneous rocks. Copyrighted.

<http://hkss.cedd.gov.hk/hkss/eng/education/GS/hkg/chapter3/figure2.jpg>

Εικόνα 10, Διαφάνεια 10: Graphic. Fossen, H., "Structural Geology". Copyrighted.

<http://folk.uib.no/nglhe/e-modules/Chapter%204%20and%205/4-5%20Stress.swf>



Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (3/8)

Εικόνα 11, Διαφάνεια 11: Copyrighted.

Εικόνα 12, Διαφάνεια 11: Mineral grains in the sub-surface experience stresses from all directions. Fossen, H., 2010, "Structural Geology". Copyrighted.

<http://folk.uib.no/nglhe/e-modules/Chapter%20and%205/4-5%20Stress.swf>

Εικόνα 13, Διαφάνεια 12: Positive and negative stress. Copyrighted.

https://o.quizlet.com/onLiKatWuhJXnQorum7HdQ_m.jpg

https://o.quizlet.com/Wg-VGJMB4bzjltVVHVRqcg_m.jpg

Εικόνα 14, Διαφάνεια 13: Copyrighted.

Εικόνα 15, Διαφάνεια 14: The stress ellipsoid with the three mutually perpendicular principal stresses, s_1 , s_2 , and s_3 . Copyrighted.

http://www.geology.sdsu.edu/visualstructure/vss/htm_hlp/fig_gif/13.gif

Εικόνα 16, Διαφάνεια 14: Diagram of an opening rift valley. Copyrighted.

http://wps.prenhall.com/wps/media/objects/374/382993/Fg02_20.gif



Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (4/8)

Εικόνα 17, Διαφάνεια 14: Golden gate bridge illustration. Copyrighted.

<http://vector-magz.com/wp-content/uploads/2013/08/golden-gate-bridge-vector.png>

Εικόνες 18-19-20, Διαφάνειες 15-16-17: Ανάλυση τάσεων. Fossen, H., 2010, Structural Geology (e-modules). Copyrighted.

<http://folk.uib.no/nglhe/e-modules/Chapter%204%20and%205/4-5%20Stress.swf>

Εικόνα 21, Διαφάνεια 18: Υπολογισμός ορθής και διατμητικής τάσης. Fossen, H., 2010, Structural Geology (e-modules). Copyrighted.

<http://folk.uib.no/nglhe/e-modules/Chapter%204%20and%205/4-5%20Stress.swf>

Εικόνα 22, Διαφάνεια 19: Μεταβολή των F_n , σ_n και F_s , σ_s που δρουν π.χ. σε ένα ρήγμα που η κλίση του (γωνία θ) μεταβάλλεται από 0° μέχρι 90° . Fossen, H., 2010, Structural Geology (e-modules). Copyrighted.

<http://folk.uib.no/nglhe/e-modules/Chapter%204%20and%205/4-5%20Stress.swf>



Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (5/8)

Εικόνες 23-24-25-26-27, Διαφάνειες 20-21: Ελλειψοειδές τάσεων (stress ellipsoid). Fossen, H., 2010, Structural Geology (e-modules). Copyrighted.

<http://folk.uib.no/nglhe/e-modules/Chapter%204%20and%205/4-5%20Stress.swf>

Εικόνες 28-29-30-31-32-33-34-35-36, Διαφάνειες 22-23-24-25-26-27-28: Graphical illustrations by Fossen, H., 2010, Structural Geology (e-modules). Copyrighted.

<http://folk.uib.no/nglhe/e-modules/Chapter%204%20and%205/4-5%20Stress.swf>

Εικόνα 37, Διαφάνεια 29: Μεταβολή του καθεστώτος τάσεων γύρω από μια βαθιά κοιλάδα. Copyrighted.

http://faculty.uml.edu/Nelson_Eby/89.520/Instructor%20pdfs/Chapter%205.%20Stress%20in%20the%20Lithosphere.pdf



Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (6/8)

Εικόνα 38, Διαφάνεια 29: Αλλαγή του καθεστώτος τάσεων από θέση σε θέση σε ένα βραχώδες σώμα, λόγω της ανομοιογένειας που παρατηρείται στη ζώνη ενός ρήγματος. Copyrighted.

http://faculty.uml.edu/Nelson_Eby/89.520/Instructor%20pdfs/Chapter%205.%20Stress%20in%20the%20Lithosphere.pdf

Εικόνα 39, Διαφάνεια 31: The uniaxial-strain reference state predicts that the vertical stress is considerably larger than the horizontal stress. Copyrighted.

http://faculty.uml.edu/Nelson_Eby/89.520/Instructor%20pdfs/Chapter%205.%20Stress%20in%20the%20Lithosphere.pdf

Εικόνες 40-41-42-43, Διαφάνειες 32-33-34-35: Graphic and animations by Fossen, H., 2010, Structural Geology (e-modules). Copyrighted. <http://folk.uib.no/nglhe/e-modules/Chapter%204%20and%205/4-5%20Stress.swf>

Εικόνα 44, Διαφάνεια 37: Ταξινόμηση καθεστώτων τεκτονικών τάσεων κατά Anderson. Copyrighted.



Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (7/8)

Εικόνα 45, Διαφάνεια 38: Copyrighted.

Εικόνα 46, Διαφάνεια 38: The orientation of various fracture types with respect to the principal stresses. Copyrighted. http://3.bp.blogspot.com/-WxgD50QjWAI/VcEc9G_bqVI/AAAAAAAAABZY/az2uscGxudg/s1600/7.4.jpg

Εικόνες 47-48-49-50, Διαφάνειες 39-41-42: Graphic and animations by Fossen, H., 2010, Structural Geology. Copyrighted.

Εικόνα 51, Διαφάνεια 43: Κριτήριο θραύσης Coulomb. Copyrighted. https://o.quizlet.com/tHRkcYUR6o0WnuVYwpJw1A_m.jpg

Εικόνες 52-53, Διαφάνεια 44: Γωνίες, κλίσεις, προσανατολισμοί. Copyrighted.

Εικόνα 54, Διαφάνεια 45: Κριτήρια Griffith και Von Mises. Copyrighted. https://o.quizlet.com/afP8htwyLj9SS0eFr9.OrA_m.jpg



Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (8/8)

Εικόνα 55, Διαφάνεια 46: Copyrighted.

http://geode.colorado.edu/~structure/teaching_GEOL3120/coursenotes/05Fail_envelope_Andersonian_Mech.pdf

