

Επαγόμενη σεισμικότητα

Μάθημα 1ο



Η επίδραση στην σεισμικότητα μιας περιοχής λόγω των ανθρωπογενών επιδράσεων στο υπέδαφος όπως είναι η πλήρωση ενός ταμιευτήρα καθώς και οι μηχανισμοί που δρουν στην εμφάνιση της επαγόμενης ή διεγερόμενης σεισμικότητας.



Ταμιευτήρες



Εξορύξεις

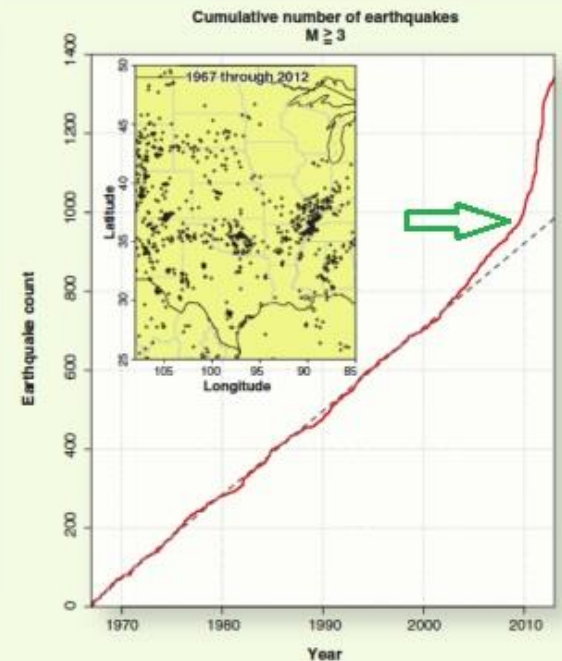
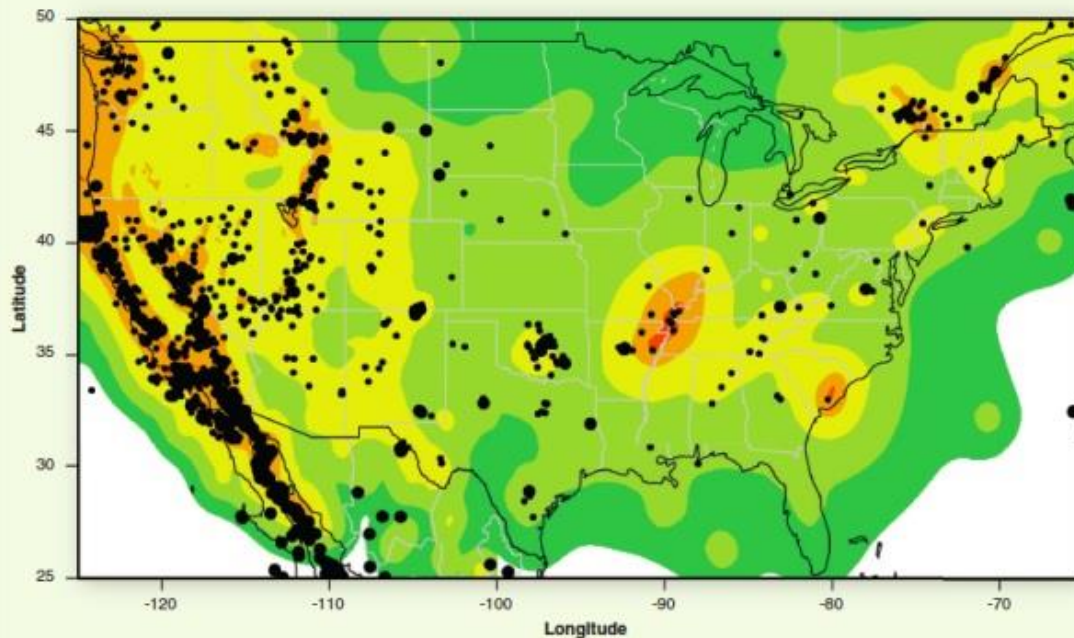
Επαγόμενη Σεισμικότητα

Πολλές ανθρώπινες δραστηριότητες μπορούν να προκαλέσουν σεισμούς!!!

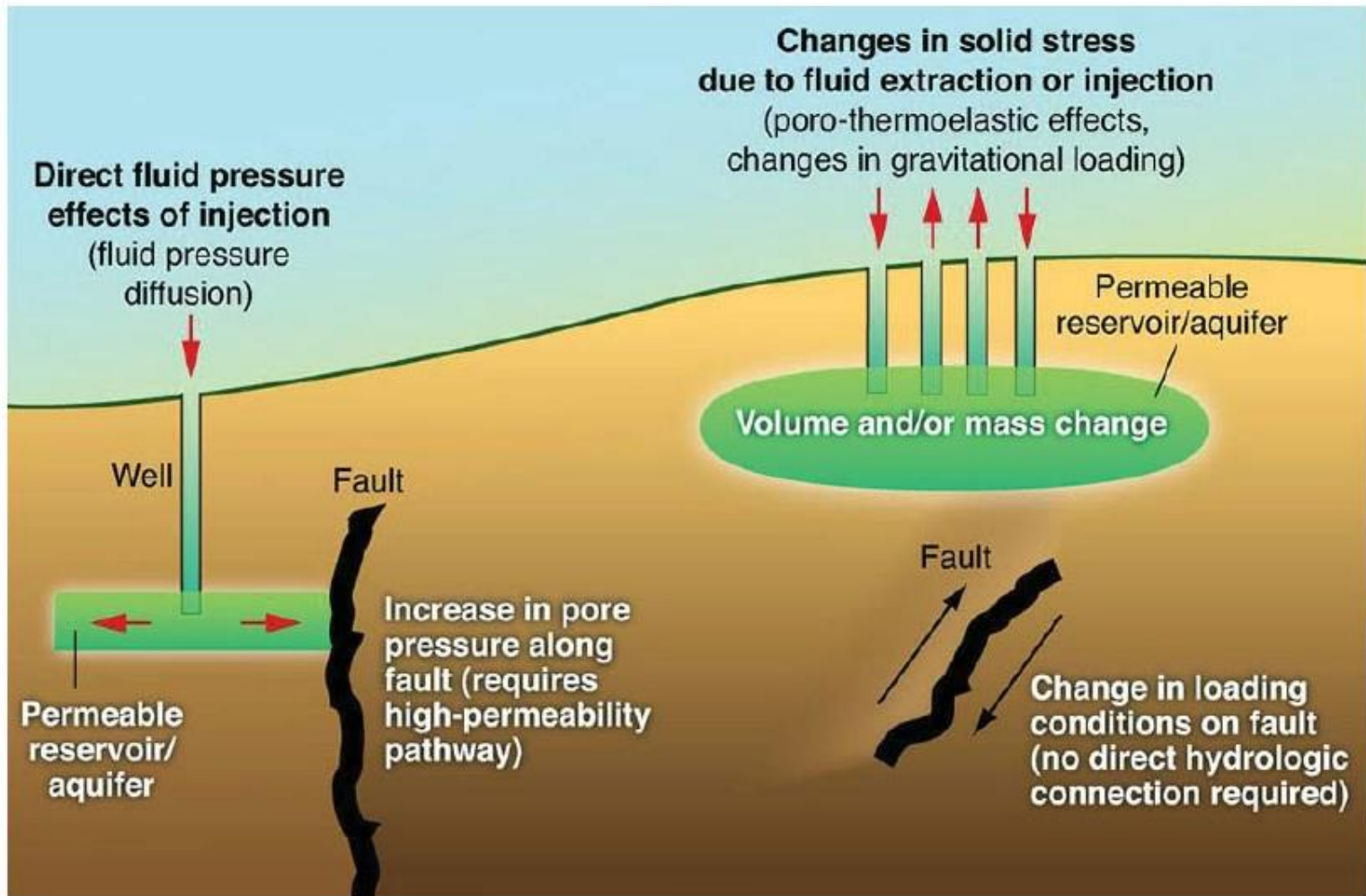
Το φαινόμενο αυτής της σεισμικής διέγερσης μιας περιοχής οφείλεται :

- πλήρωση ταμιευτήρων (Φράγματα)
- Αποθήκευση/δέσμευση CO₂
- άντληση παραγωγής πετρελαίου / φυσικού αερίου
- Υδραυλική ρωγμή (σχιστολιθικό αέριο/σφιχτή άμμος αέριο)
- άντληση γεωθερμικών ρευστών
- εισπιέσεις ρευστών υπό μορφή ενέσεων σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης
- υπόγειες εξορύξεις μεγάλης κλίμακας (Μεταλλεία)
- επιφανειακές εκσκαφές σε ιδιαίτερα μεγάλη κλίμακα
- Διάθεση λυμάτων

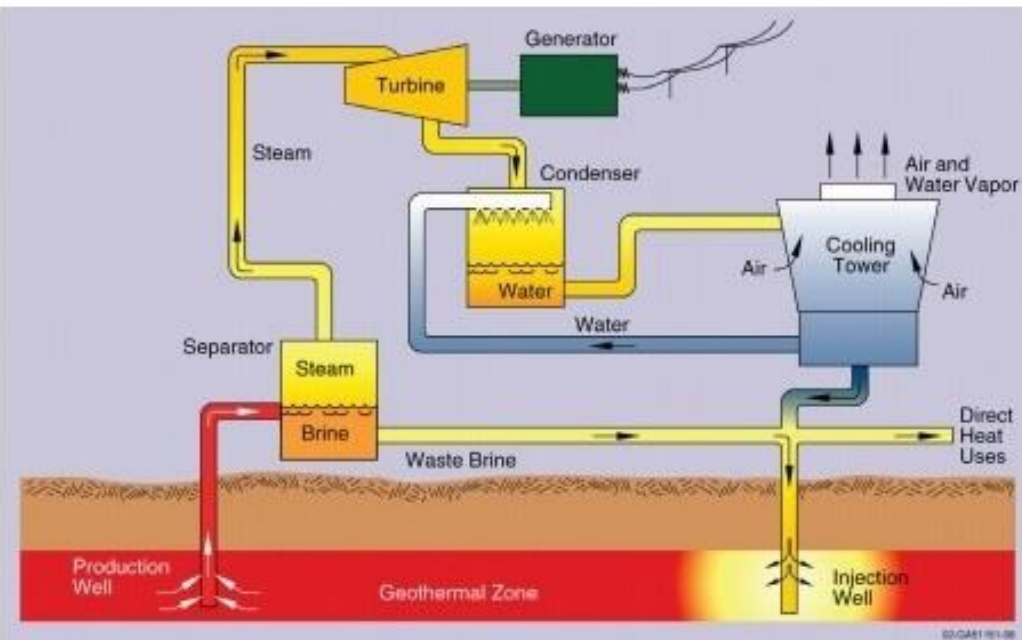
Σεισμοί κοντά σε περιοχές διάθραξης λυμάτων.



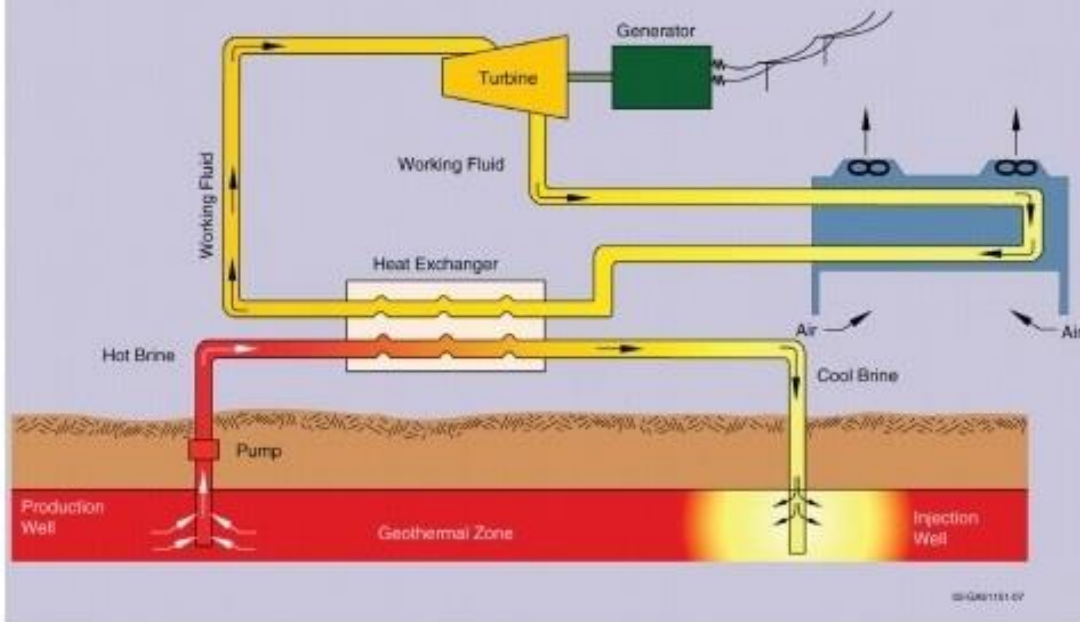
Από το 2010, υπάρχει μια σταθερή αύξηση των σεισμών στις ΗΠΑ. 300 σεισμοί μεγέθους $M > 3$ παρατηρήθηκαν από το 2010-2012 έναντι μέσου όρου 21 συμβάντων στο παρελθόν (W.L. Ellsworth, 2013).



(a)



(b)



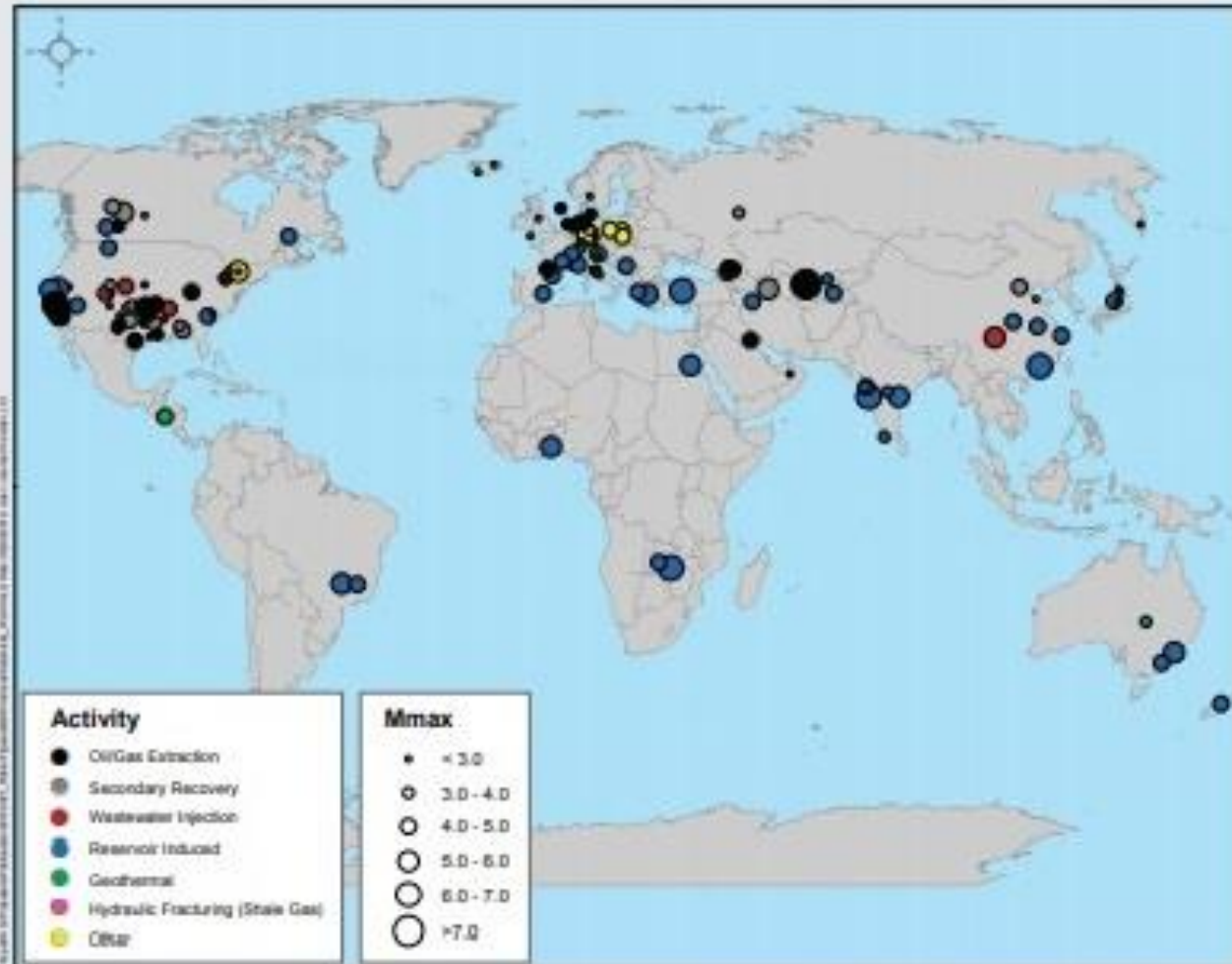


Figure 1 Worldwide locations of seismicity reported in the technical literature caused by or likely related to human activities, with the maximum magnitude reported to be induced at each site.

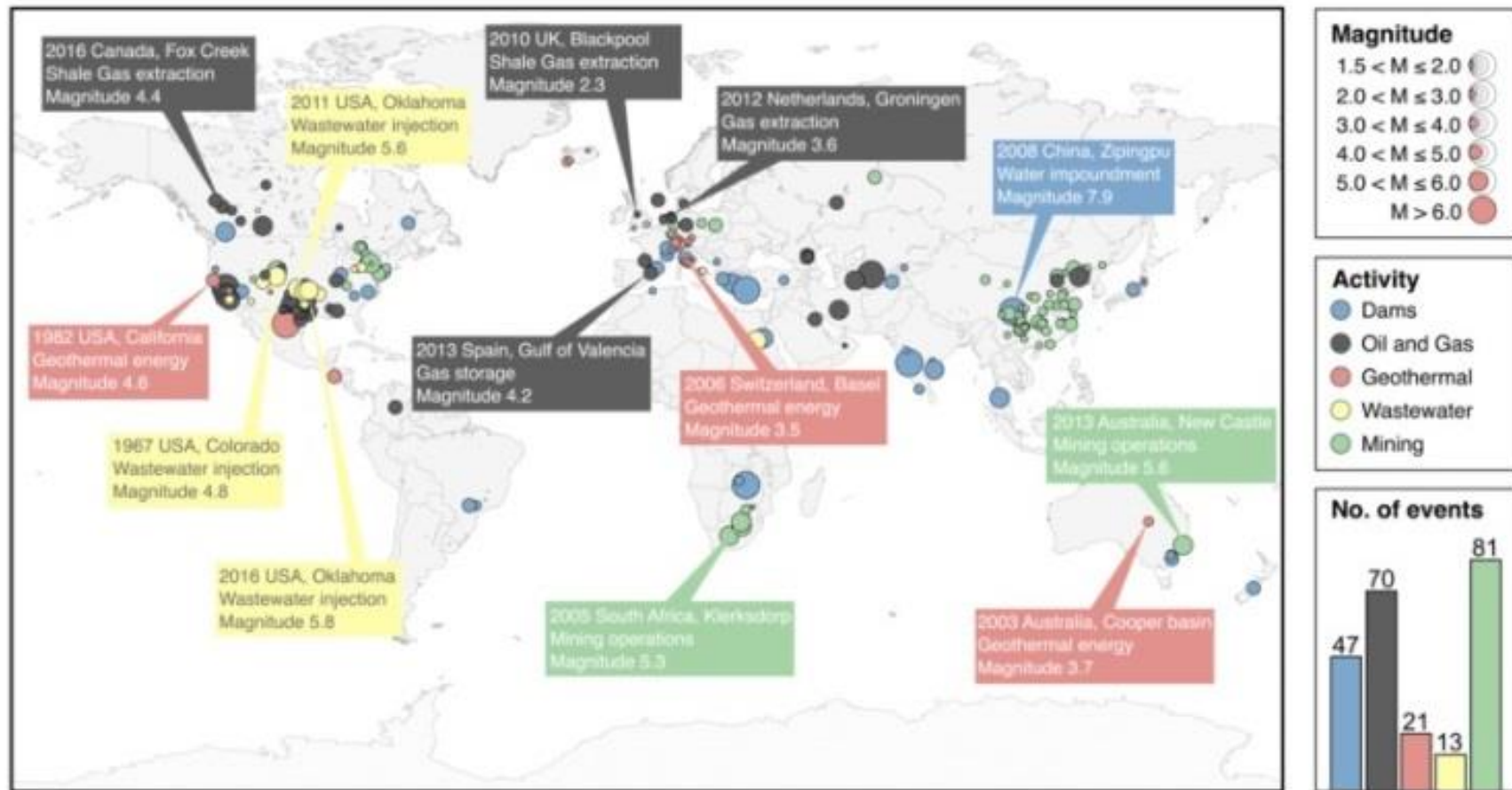
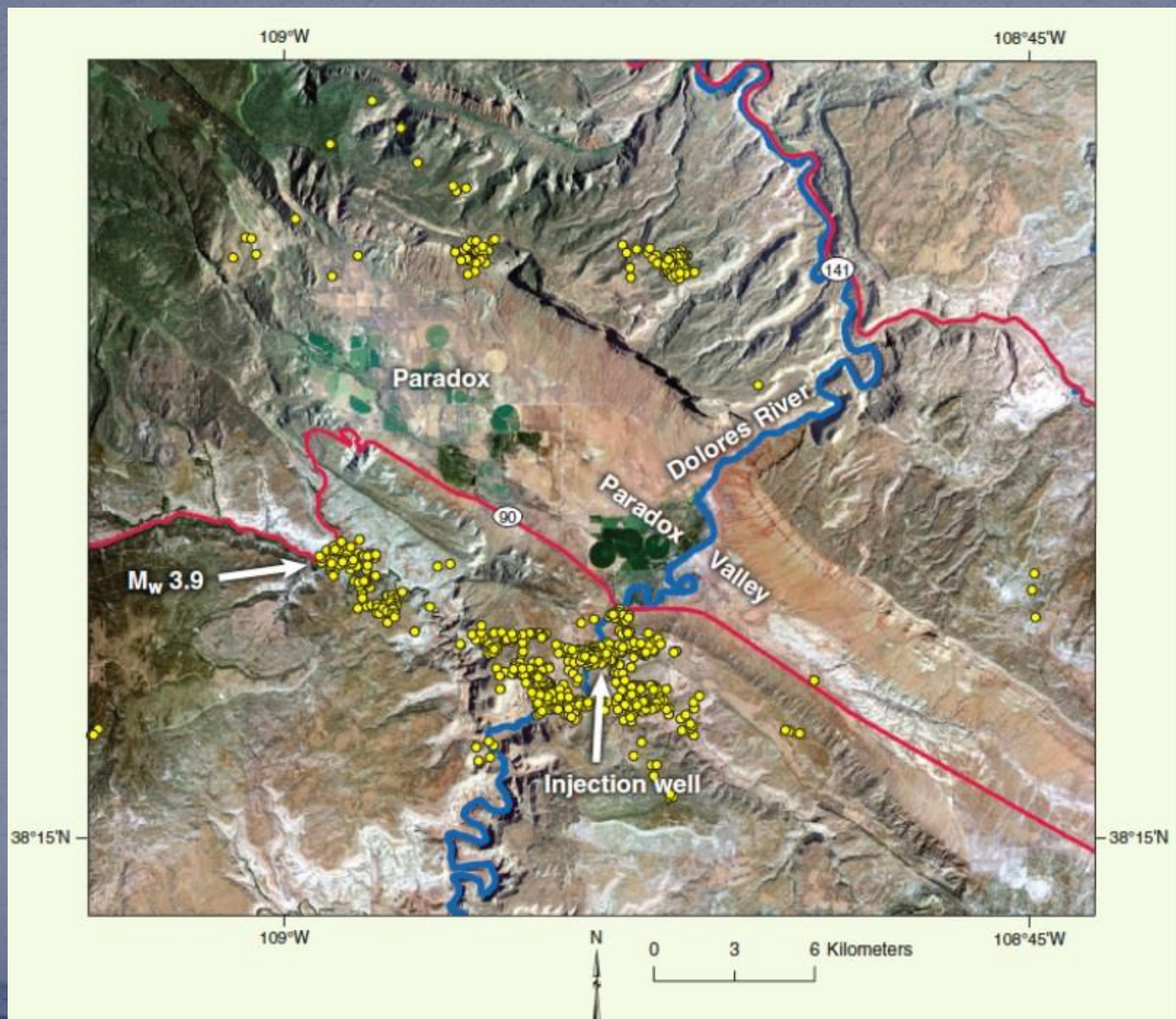


Figure 2: Global distribution of documented cases of induced seismicity (updated to 31/08/2016), classified by magnitude and type of activity. The colored boxes contain informations on the most relevant events (from [2]).

Επαγόμενη σεισμικότητα λόγω έκχυσης αποβλήτων (ρευστά) μέσω γεώτρησης (Περιοχή Rocky Mountain USA).



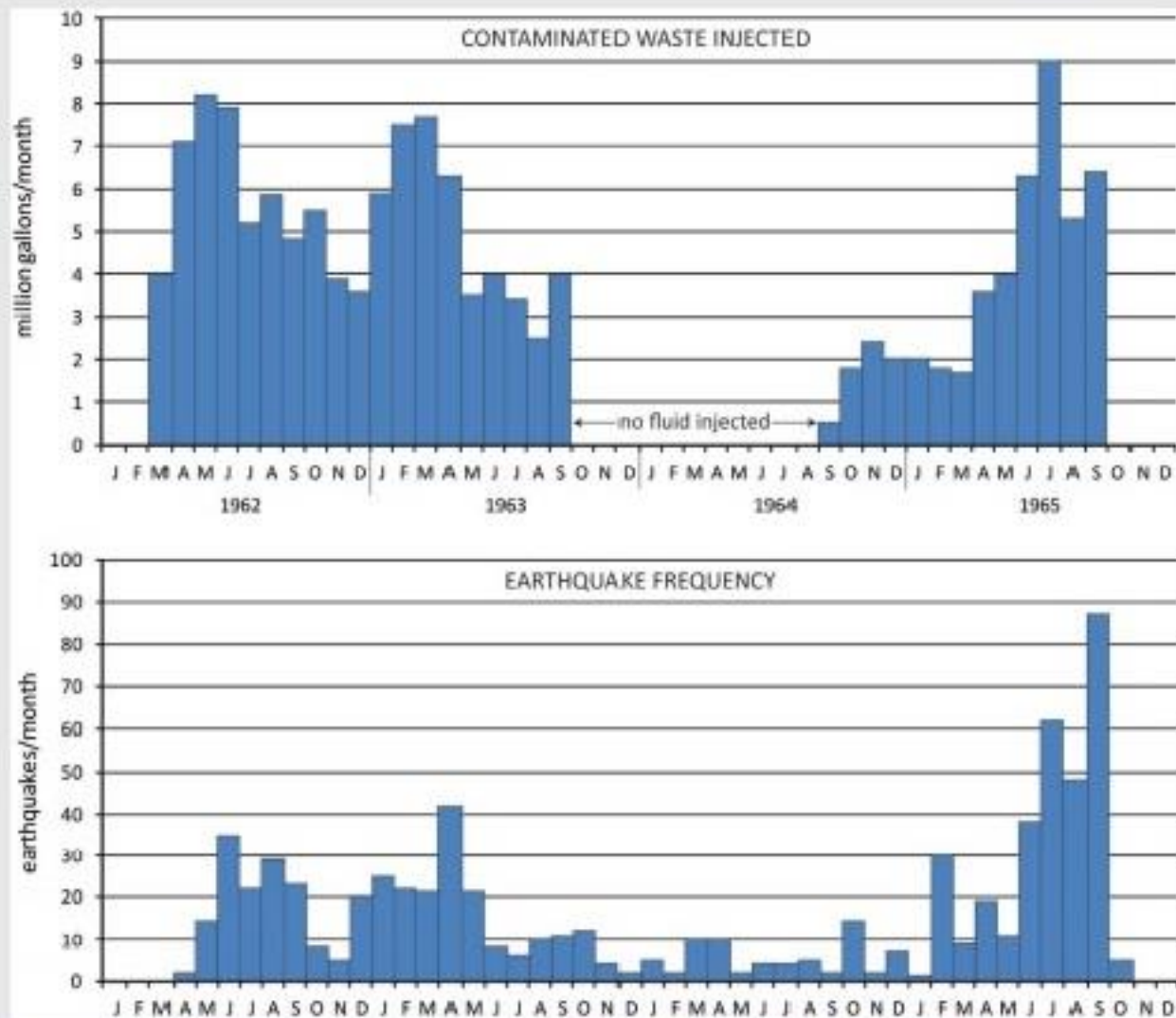


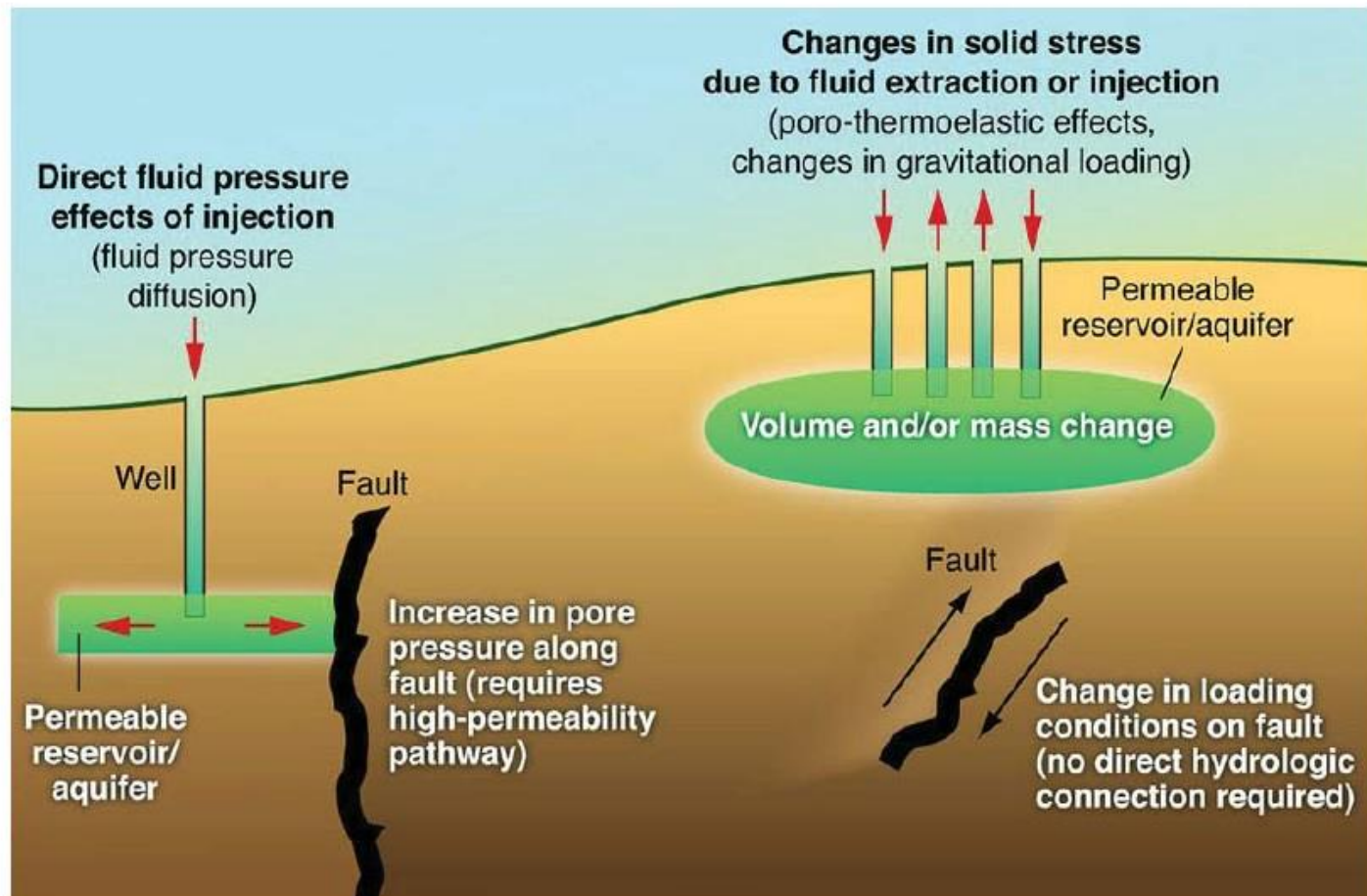
Figure Histograms showing relation between volume of waste injected into the Rocky Mountain Arsenal well and earthquake frequency. SOURCES: Adapted from Evans (1966); Healy et al. (1968); McClain (1970); Hsieh and Bredehoeft (1981).

Πάνω από **95** διαπιστωμένες περιπτώσεις μέχρι σήμερα με παλαιότερη την περίπτωση του φράγματος **Hoover** της λίμνης Mead της οποίας η πλήρωση πραγματοποιήθηκε το 1936 (**Carder, 1945**).

Βασικότεροι παράγοντες

- Γεωλογία περιοχής
- Εντατικό πεδίο
- Παρουσία ενεργών ρηγματών
- Υδρομηχανικές ιδιότητες υποκείμενων πετρωμάτων
- Διαστάσεις ταμιευτήρα
- Ρυθμός μεταβολής της στάθμης (**dh/dt**)
- Αύξηση της πορικής πίεσης
- Διαταραχή των τάσεων

Σχηματικό διάγραμμα των μηχανισμών των επαγόμενων σεισμών. **Αριστερά** αύξηση της πορικής πίεσης και **δεξιά** μεταβολή της διατμητικής και της κανονικής πίεσης που δρουν πάνω σε ένα ρήγμα.



Σημαντικοί προβληματισμοί σχετικά με την επαγόμενη σεισμικότητα μιας περιοχής.

- Ποιος είναι ο σεισμικός Κίνδυνος (Risk) και πώς μπορεί να μετριαστεί;
- Πόση σεισμικότητα θα δημιουργηθεί;
- Ποιο είναι το πιθανό μέγεθος του μέγιστου συμβάντος;
- Θα γίνει αισθητή η σεισμικότητα;
- Θα προκαλέσει ζημιά στην επιφάνεια;
- Ποια είναι η αντίληψη του κοινού για τον κίνδυνο;
- Πώς να μετριαστεί ο σεισμικός κίνδυνος;

Ταξινόμηση επαγόμενης σεισμικότητας με κριτήριο τον χρόνο εμφάνισής της από Simpson et al, 1988.

➤ **ταχεία** απόκριση

| | |
|-----------|--------------------------------------|
| Nurek | M=4.6 (7 μήνες μετά την πλήρωση) |
| Kariba | M=6.2 (2.5 χρόνια μετά την πλήρωση) |
| Κρεμαστών | M=6.2 (6,5 μήνες μετά την πλήρωση) |
| Talbingo | σμηνοσειρές σεισμών M>3.5 |

➤ **καθυστερημένη** απόκριση

| | |
|----------|-----------------------|
| Koyna | M=6.3 (5 χρόνια μετά) |
| Oroville | M=5.7 (8 χρόνια μετά) |
| Aswan | M=5.6 (9 χρόνια μετά) |

Ταξινόμηση επαγόμενης σεισμικότητας με βάση την φόρτιση αφενός και τον συνδυασμό απότομης διακύμανσης και διήθησης του νερού αφετέρου (Talwani, 1997).

➤ **Τύπος I** ή αρχική σεισμικότητα

Σεισμική δραστηριότητα επιφανειακών σεισμών μικρού μεγέθους (σημοσειρές) με πιθανή εμφάνιση μεγαλύτερου μεγέθους όταν η πλήρωση φτάσει στα ανώτατα επίπεδα (μήνες έως χρόνια). Πιθανή αστράγγιστη συμπεριφορά.

➤ **Τύπος II** ή καθυστερημένη σεισμικότητα

Υψηλές τιμές μεγέθους, μεγαλύτερα εστιακά βάθη, έκταση σε μια πιο ευρύτερη περιοχή $\geq 10\text{Km}$.

Συχνή εμφάνιση σε περιοχές με ενεργό ρηξιγενή ζώνη κάθετα στον ταμιευτήρα πλήρωσης (έως και πάνω από 30χρόνια) (Piccinelli et al, 1995).

Νόμος ενεργού τάσης (Terzaghi, 1923)

Ερμηνεία της επίδρασης της πορικής πίεσης στην διάρρηξη, στην παραμόρφωση και στην διέγερση σεισμικών γεγονότων (Chen, 1992).

$$\sigma' = \sigma - p_p$$

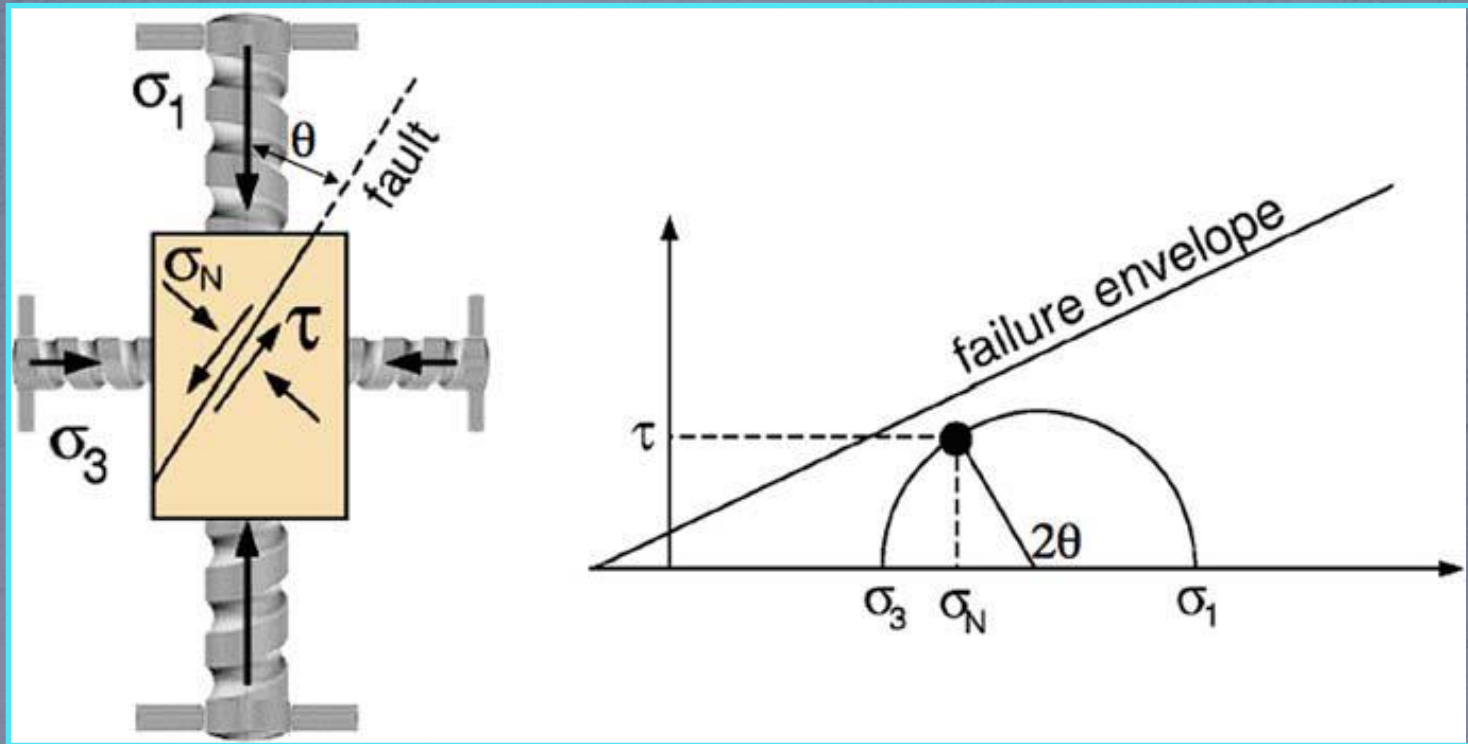
Όπου,

σ = συνολική τάση

p_p = πίεση ρευστού των πόρων

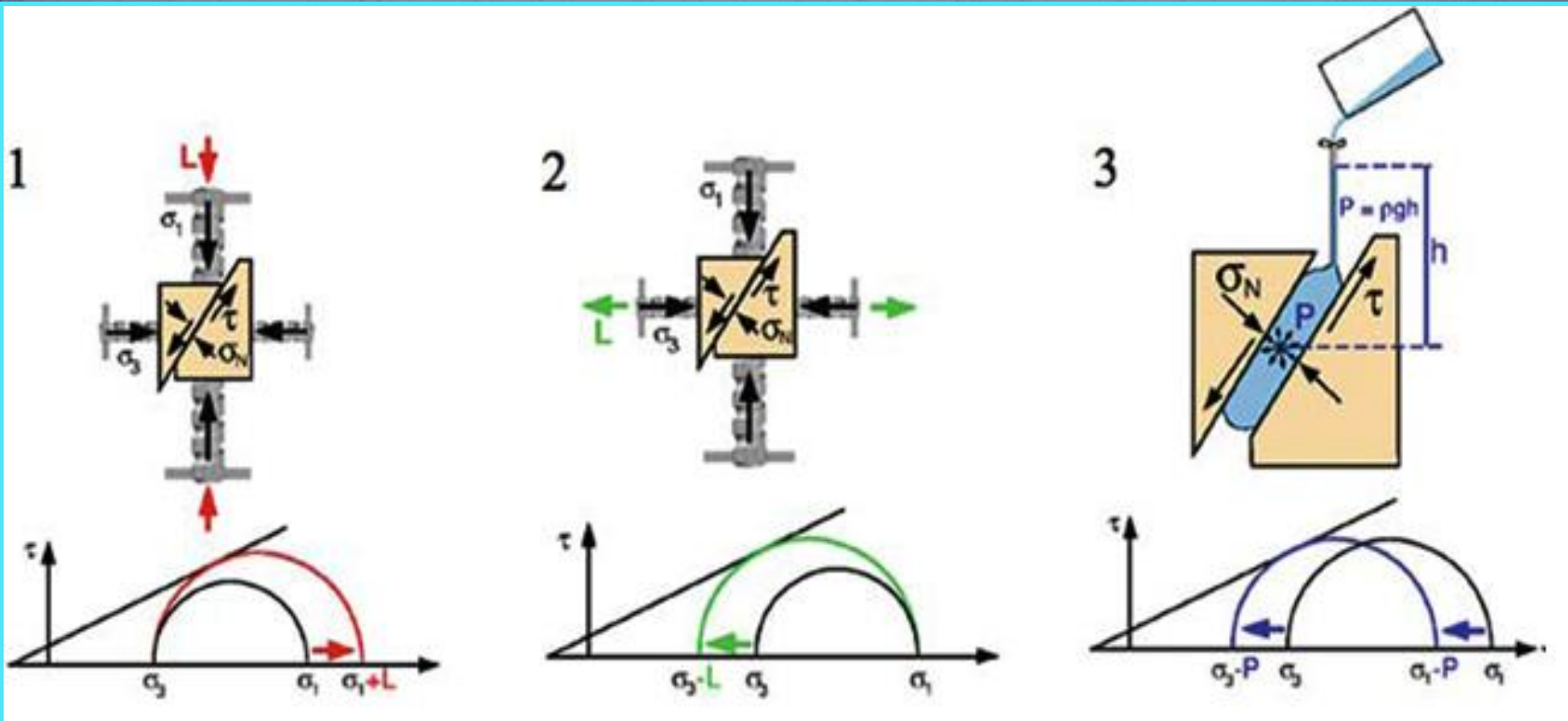
- $\sigma'_v = \sigma_v - p_p$ (ενεργό κατακόρυφη τάση)
- $\sigma'_h = \sigma_h - p_p$ (ενεργό οριζόντια τάση)

Κύκλος Mohr-Coulomb



Wang & Manga (2010)

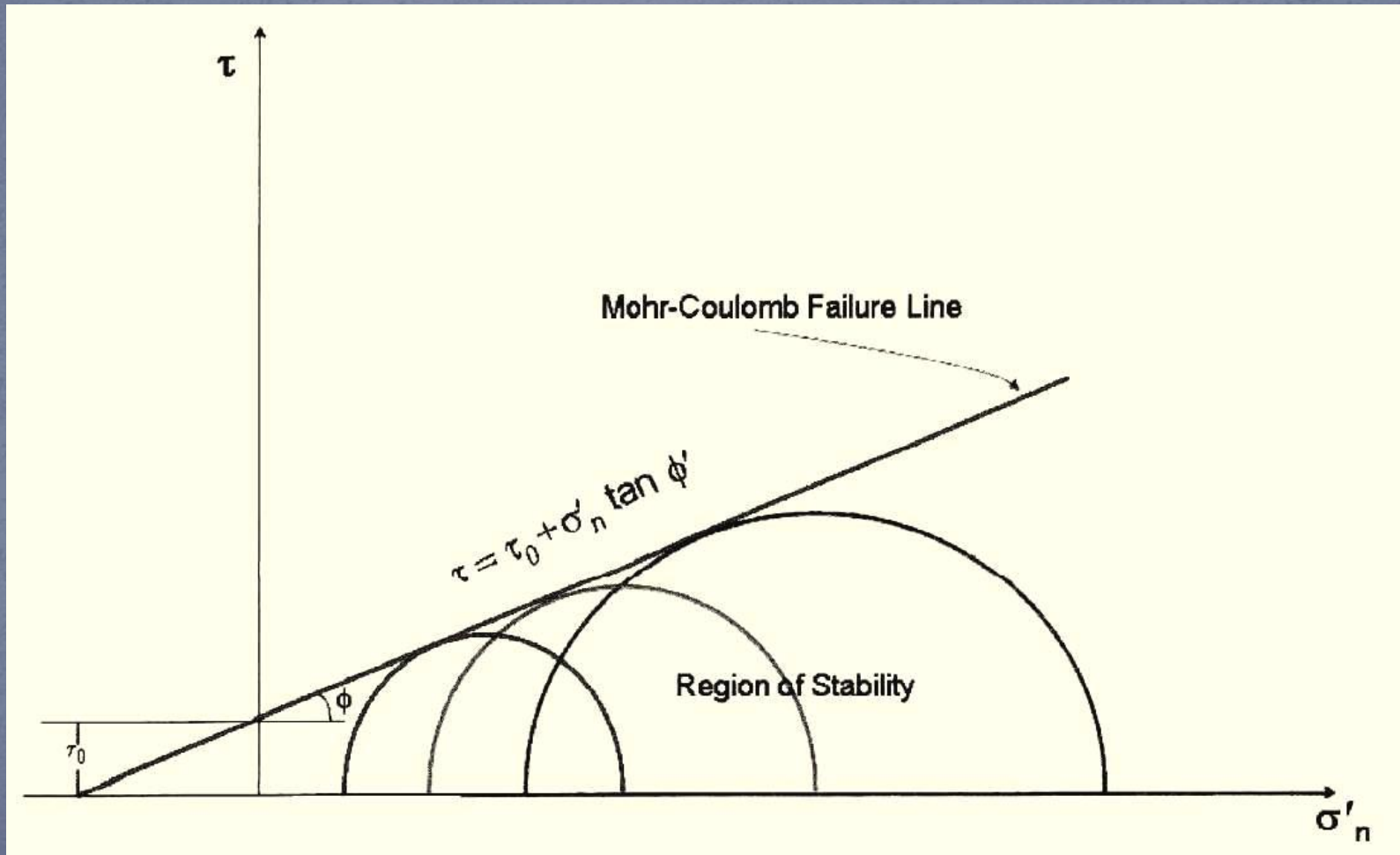
Δράση ενεργού τάσης



(Saar & Manga, 2003)

Σχέση τάσης και νόμος αστοχίας Mohr-Coulomb

$$\tau = \tau_0 + \sigma'_n \tan \phi'$$



Επίδραση της πορικής πίεσης σε σχέση με την κατανομή των τάσεων στα πετρώματα

Πορώδες πετρωμάτων εξωτερικής λιθόσφαιρας

Πρωτογενές



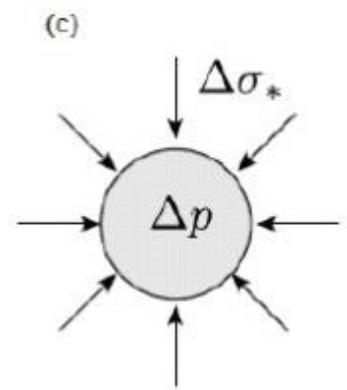
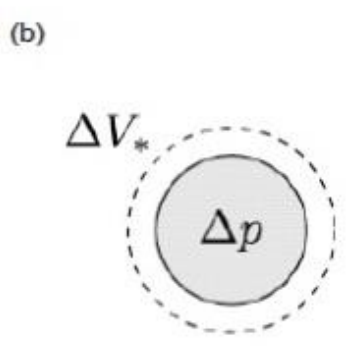
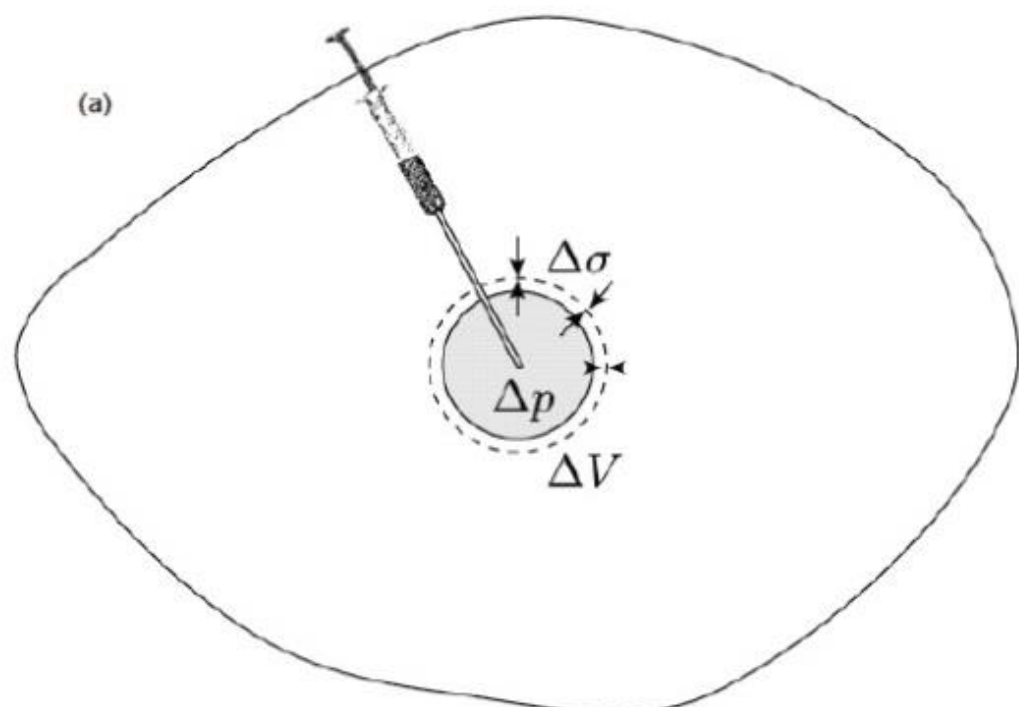
Δευτερογενές

$$p_p = \rho_w g Z$$

$$\sigma_v = \rho_b g Z$$

$$(\sigma'_v = \sigma_v - p_p)$$

$$\sigma'_v \sim (\rho_b - \rho_w) g Z$$



Ελαστική απόκριση των πόρων κατά την πλήρωση ενός ταμιευτήρα

Σύμφωνα με **Talwani** (1997)

- **Στιγμαιαία** αποτελέσματα (αστραγγιστη απόκριση φόρτισης)
- **Καθυστερημένα** αποτελέσματα (στραγγισμένη απόκριση -μεταβολές της πορικής πίεσης)

Ορισμός της **μεταβολής της αντοχής (ΔS)** του πετρώματος ή ρήγματος από **Bell & Nur** (1978)

$$\Delta S = \mu_f (\Delta \sigma_n - \Delta p_p) - \Delta \tau$$



όπου,

μ_f = συντελεστής τριβής της επιφάνειας ολίσθησης του ρήγματος

$\Delta \sigma_n$ = μεταβολή συμπιεστικής κανονικής τάσης (ολικής τάσης)

Δp_p = μεταβολή της πορικής πίεσης

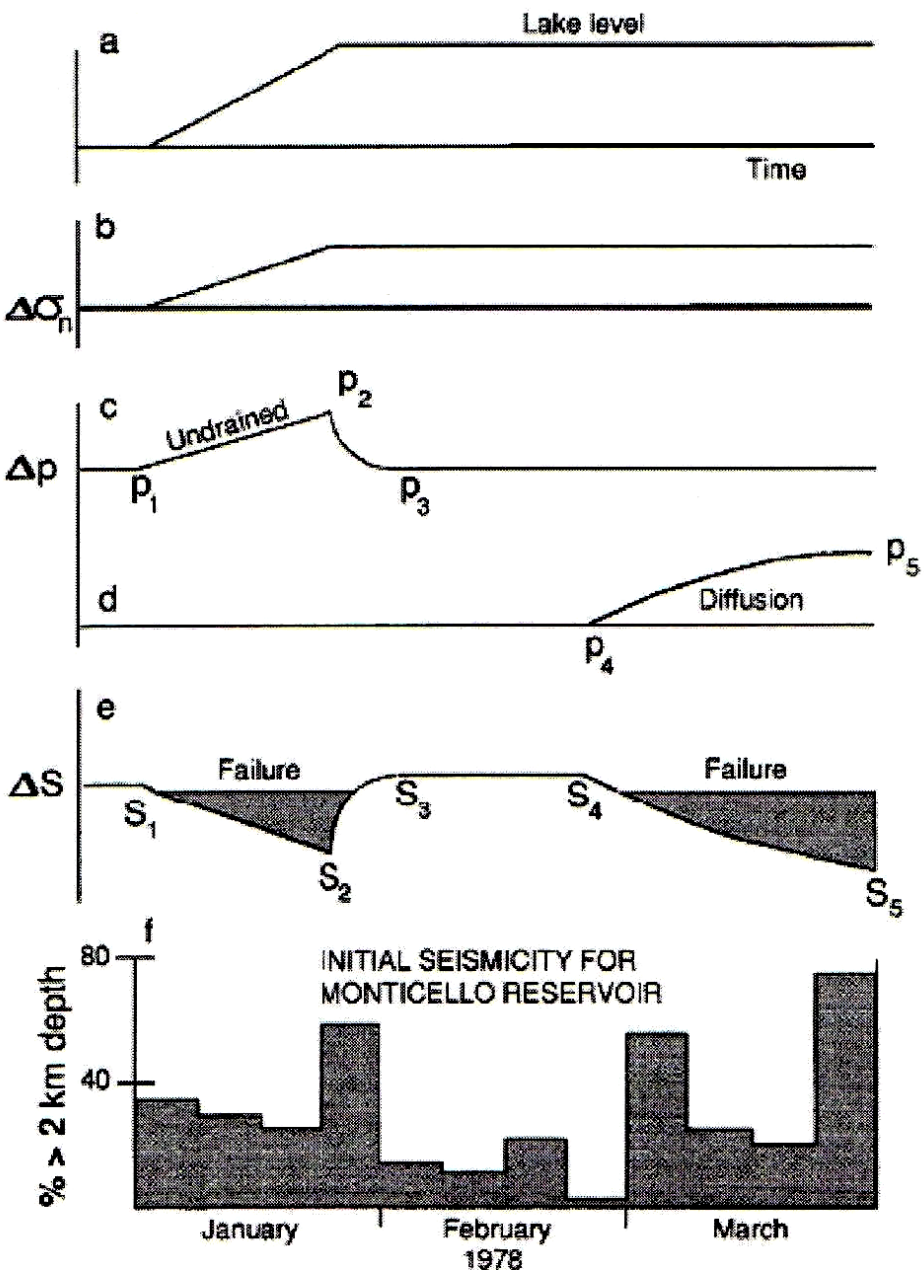
$\Delta \tau$ = μεταβολή διατμητικής τάσης

ΔS = μεταβολή της αντοχής του πετρώματος ή ρήγματος

Από την παραπάνω εξίσωση παρατηρείται ότι:

- μείωση της αντοχής του πετρώματος ή του ρήγματος (ΔS) μπορεί να προκληθεί από μεταβολές είτε της πορικής πίεσης είτε της σχετιζόμενης με τη φόρτιση, κανονικής τάσης ($\Delta\sigma_n$).

Η εξίσωση $\Delta S = \mu_f (\Delta\sigma_n - \Delta p_p) - \Delta\tau$ είναι παρόμοια με την εξίσωση $\tau = \tau_0 + \sigma'_n \tan \phi'$ και είναι μια άλλη εκδοχή του κριτηρίου διάρρηξης Mohr-Coulomb, το οποίο συσχετίζει τη διατμητική τάση κατά την ολίσθηση, με τη δημιουργία της ενεργού τάσης και το συντελεστή τριβής (Talwani, 1997).



Απόκριση αρχικής πλήρωσης

$P_1 \rightarrow P_2$
(αστράγγιστη απόκριση)

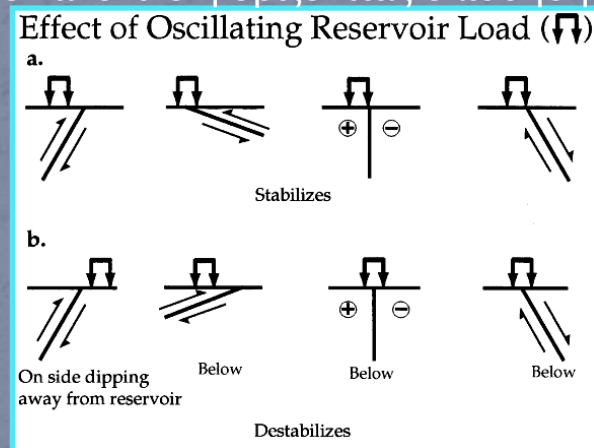
$P_2 \rightarrow P_3$
(στραγγισμένη απόκριση)

$P_4 \rightarrow P_5$
(διήθηση πορικής πίεσης)

Εξάρτηση της θέσης του ταμιευτήρα και του είδους της διάρρηξης με την διακύμανση της στάθμης του ταμιευτήρα (Roeloffs, 1988).

Περιπτώσεις σταθεροποίησης (μη εμφάνιση επαγόμενης σεισμικότητας) :

- προσκολλημένος στην πλευρά **μεγάλης κλίσης ανάστροφου ρήγματος**
- απευθείας επάνω και εκατέρωθεν από μικρής κλίσης ανάστροφο ρήγμα
- πάνω σε επιφανειακό κανονικό ή οριζόντιας ολίσθησης ρήγμα



Περιπτώσεις αποσταθεροποίησης (εμφάνιση επαγόμενης σεισμικότητας):

- στο υποκείμενο τμήμα μεγάλης κλίσης ανάστροφου ρήγματος
- προσκολλημένος στην πλευρά μικρής κλίσης ανάστροφου ρήγματος
- πάνω από οριζόντιο ή κανονικό ρήγμα

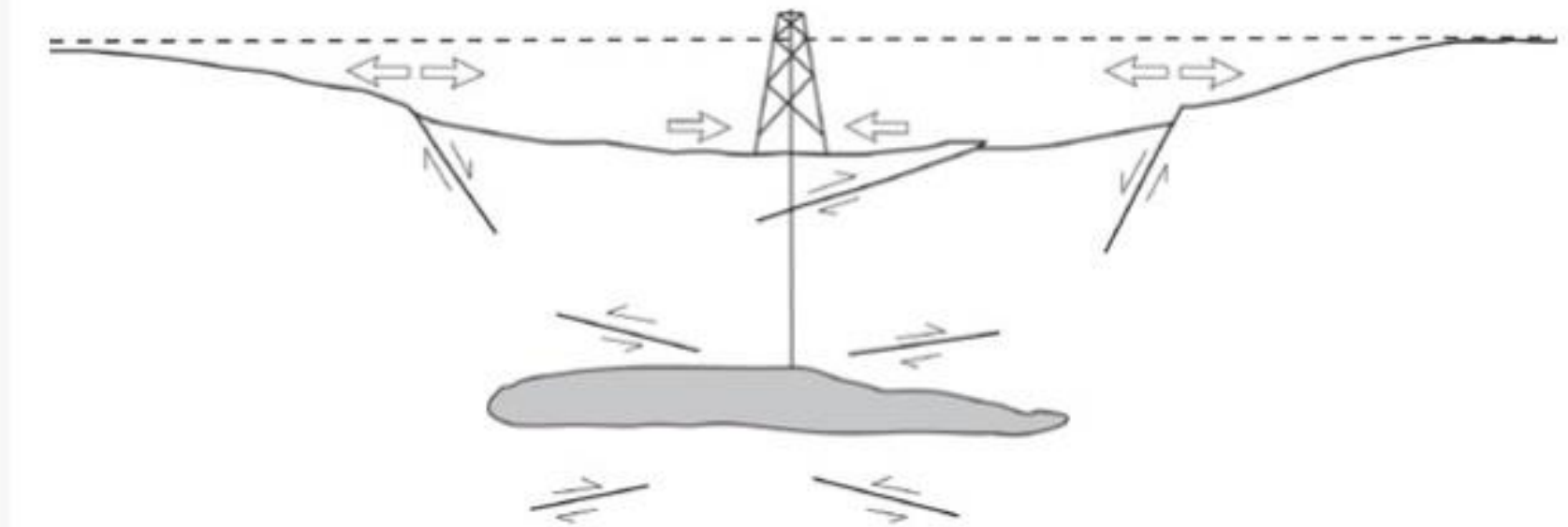


FIGURE 2.2 Observed faulting suggested to be associated with fluid withdrawal. Open arrows denote horizontal strain. In this interpretation, normal faults develop on the flanks of a field when the oil reservoir is located in a region of crustal extension. Reverse faults may develop above and below the reservoir if the reservoir is located in a region undergoing compression. Adapted after Segall (1989).

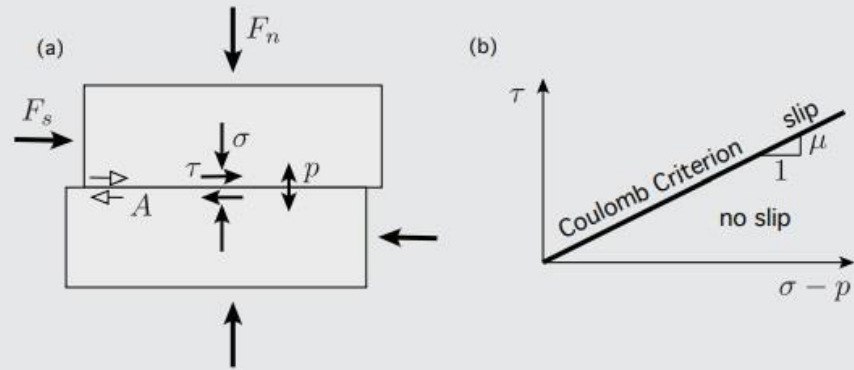


Figure 1 (a) Shearing of a jointed block subjected to normal force F_n and shear force F_s , with fluid inside the joint at pressure p . Slip along the joint is triggered when the shear stress τ is equal to the frictional strength $\mu(\sigma - p)$, where $(\sigma - p)$ is the effective stress and μ is the coefficient of friction. (b) Graphical representation of the Coulomb criterion: there is no slip if the "point" $(\sigma - p, \tau)$ is below the critical line defined by slope μ .

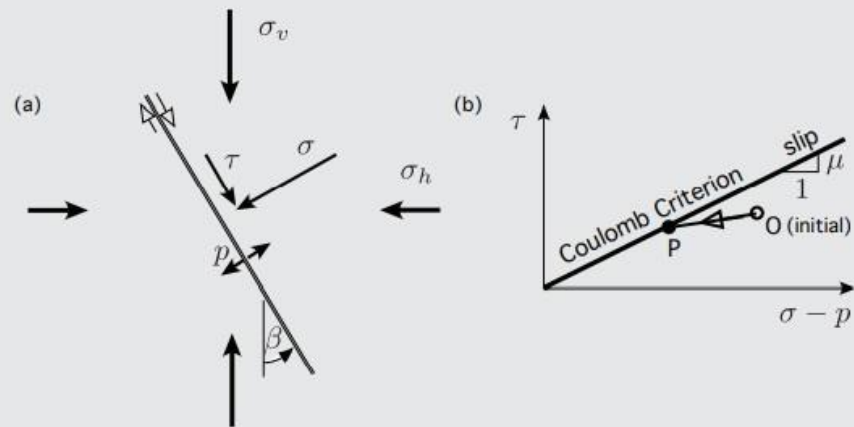


Figure 2 (a) The normal and shear stresses (σ and τ) acting across the fault depend on the vertical and horizontal stress (σ_v and σ_h) and the fault inclination (β). (b) Fluid injection or extraction could induce changes in the stress and the pore pressure; for example, fluid injection could move the initially stable "point" "O" in Figure 2b to a new position "P" that is on the critical Coulomb line, thus triggering slip on the fault. The inclination of the segment OP is a function of the poroelastic coupling described in Box 2.3.

ure 2a). The ratio of the mean horizontal stress to the vertical stress (Figure 2b) appears to vary over a narrower range with increasing depth, the ratio being generally less than 1 at depths larger than 2 km (~1.2 miles).

The relative magnitude of the three principal stresses, σ_h , σ_H , and σ_v , establishes the conditions for the orientation of the faults. Three regimes of stress, each associated with different fault orientations, are commonly defined (Figure 3): (a) thrust fault regime with σ_v equal to the minimum principal stress, (b) normal fault regime

continued

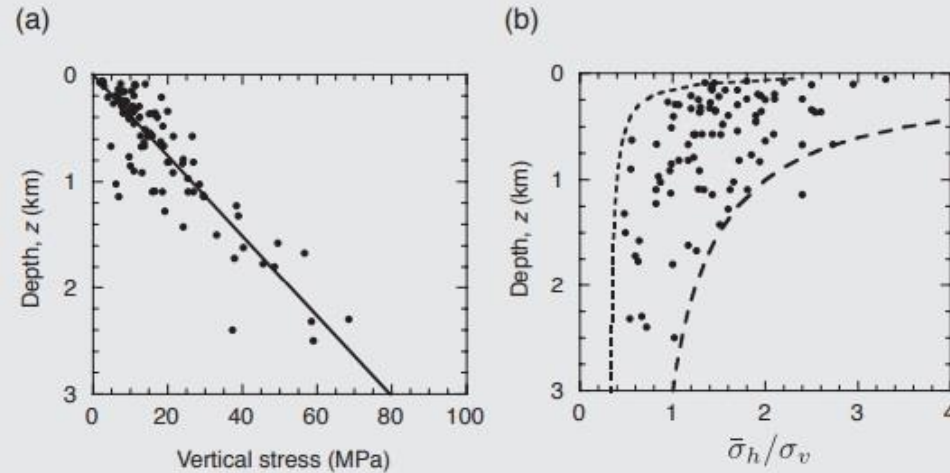


Figure 2 (a) Vertical stress variation with depth; the linear trend corresponds to a mean density of $2,700 \text{ kg/m}^3$. (b) Variation of the ratio of the mean horizontal stress $(\sigma_H + \sigma_h)/2$ over the vertical stress σ_v , with depth. SOURCES: Figure modified from Jaeger et al. (2007), which was itself redrawn from the original figure of Brown and Hoek (1978).

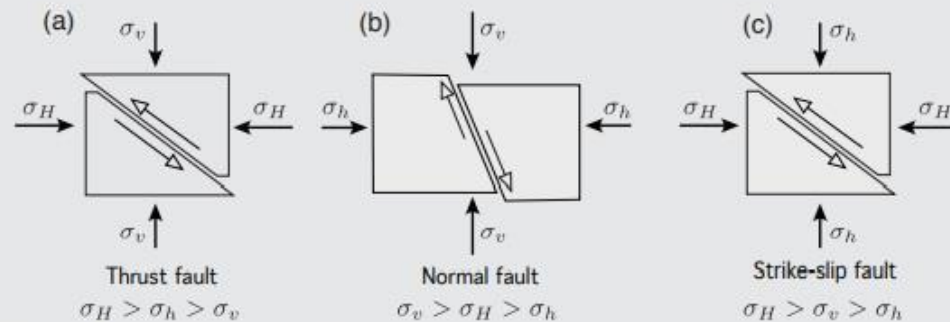


Figure 3 (a) Thrust fault, (b) normal fault, and (c) strike-slip fault. (Cross sections shown are in vertical plane for (a) and (b) and horizontal plane for (c).)

Σας ευχαριστώ
για την
προσοχή σας