Οι ιδιότητες της σεισμικής πηγής ως πληροφορία εισόδου στην εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου

Σώκος Ευθύμιος

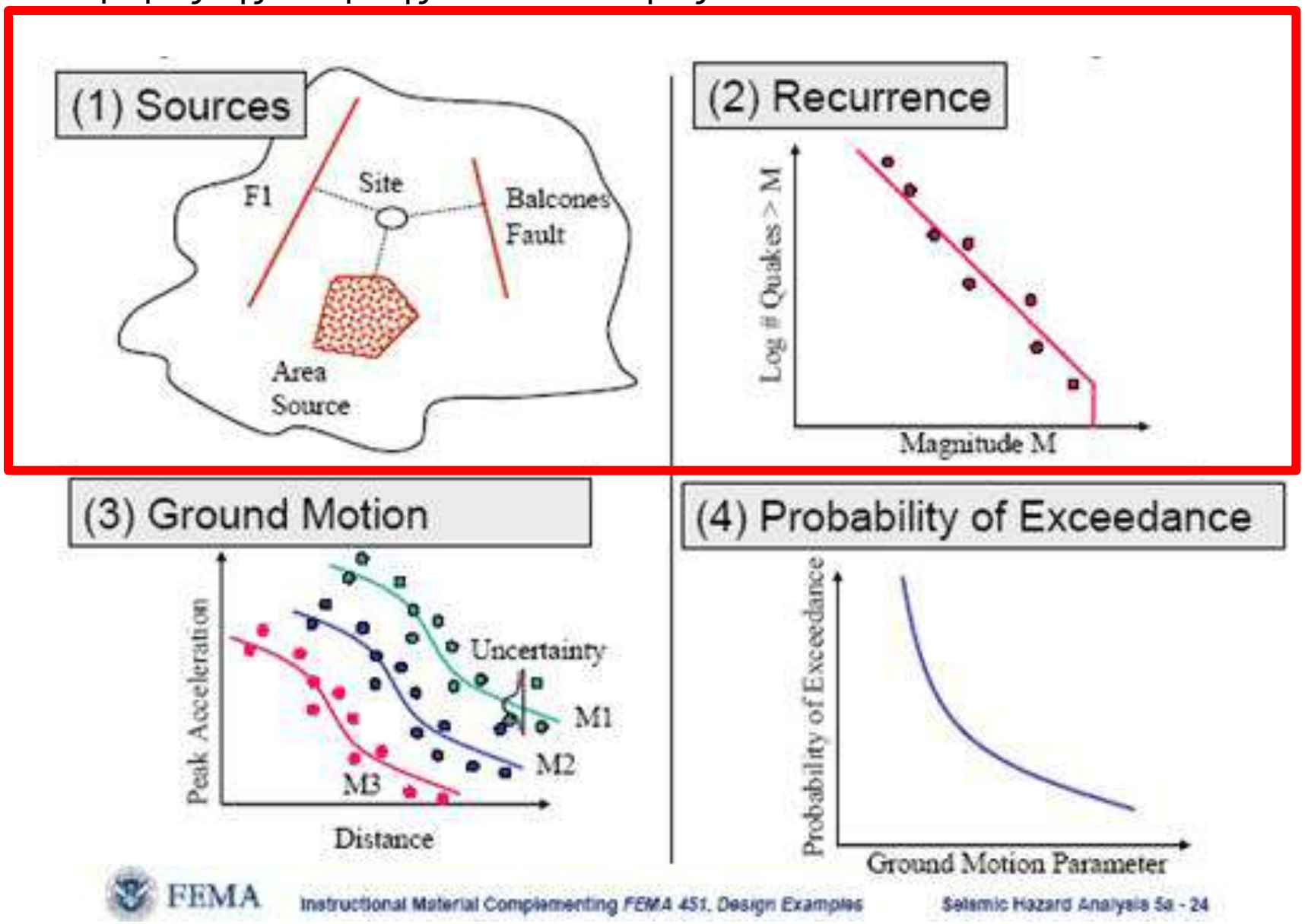
Επικ.Καθηγητής
Πανεπιστήμιο Πατρών - Τμήμα Γεωλογίας – Εργαστήριο Σεισμολογίας

«Training Course on Seismic Risk Assessment in Specific Areas with Monumental Structures»

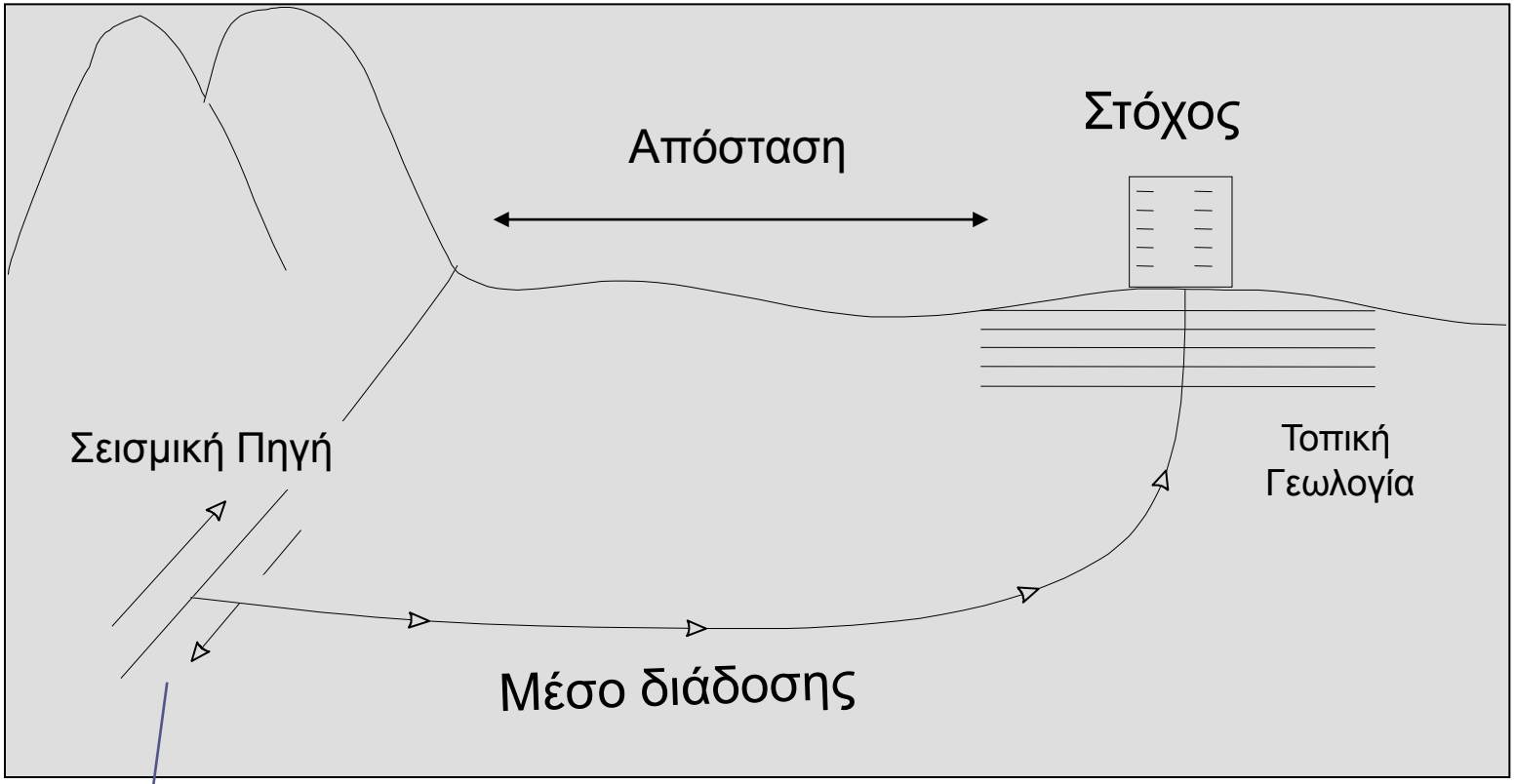
Δομή παρουσίασης

- Τι είναι μια σεισμική πηγή, πως την αναγνωρίζουμε
- Μοντέλα περιγραφής και ιδιότητες της σεισμικής πηγής
- Πως υπολογίζουμε τις ιδιότητες αυτές
- Η σεισμική πηγή στις σχέσεις εξασθένισης
- Εισαγωγή της σεισμικής πηγής στη διαδικασία υπολογισμού της σεισμικής επικινδυνότητας

Υπολογισμός της Σεισμικής Επικινδυνότητας



Εδαφικές κινήσεις σε μια θέση



Γεωλογία, Σεισμολογία,
Γεωφυσική, Γεωδαισία κλπ

Ορισμός

Ρήγμα: Μια γεωλογική δομή η οποία έχει δυνατότητα γένεσης σεισμών. Ενεργό ή μη ρήγμα..???

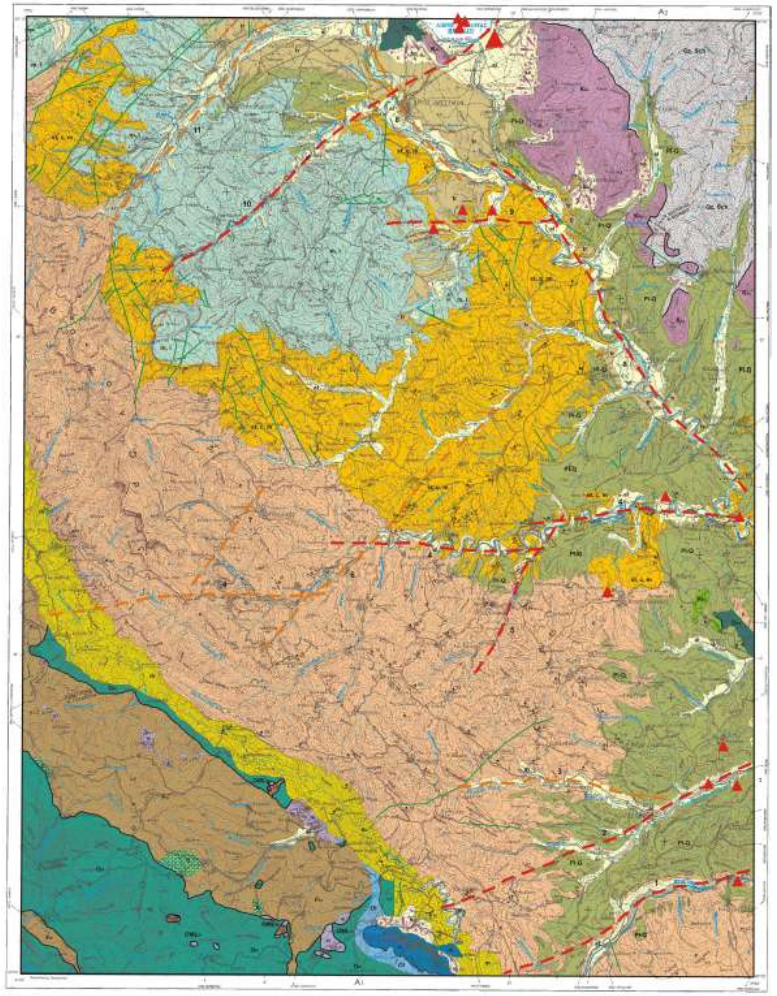
Σεισμική ζώνη: Μια περιοχή με γνωστή σεισμική επικινδυνότητα χωρίς γνωστά ρήγματα.

Ερωτήσεις σχετικές με τα χαρακτηριστικά της σεισμικής πηγής

- Γεωμετρία - Τύπος διάρρηξης
- Ρυθμός έκλυσης σεισμικότητας/ολίσθησης
- Μέγιστο μέγεθος
- Χρόνος από προηγούμενη ενεργοποίηση
- Μετατόπιση ανά σεισμικό γεγονός

Αναγνώριση των σεισμικών πηγών Γεωλογική πληροφορία

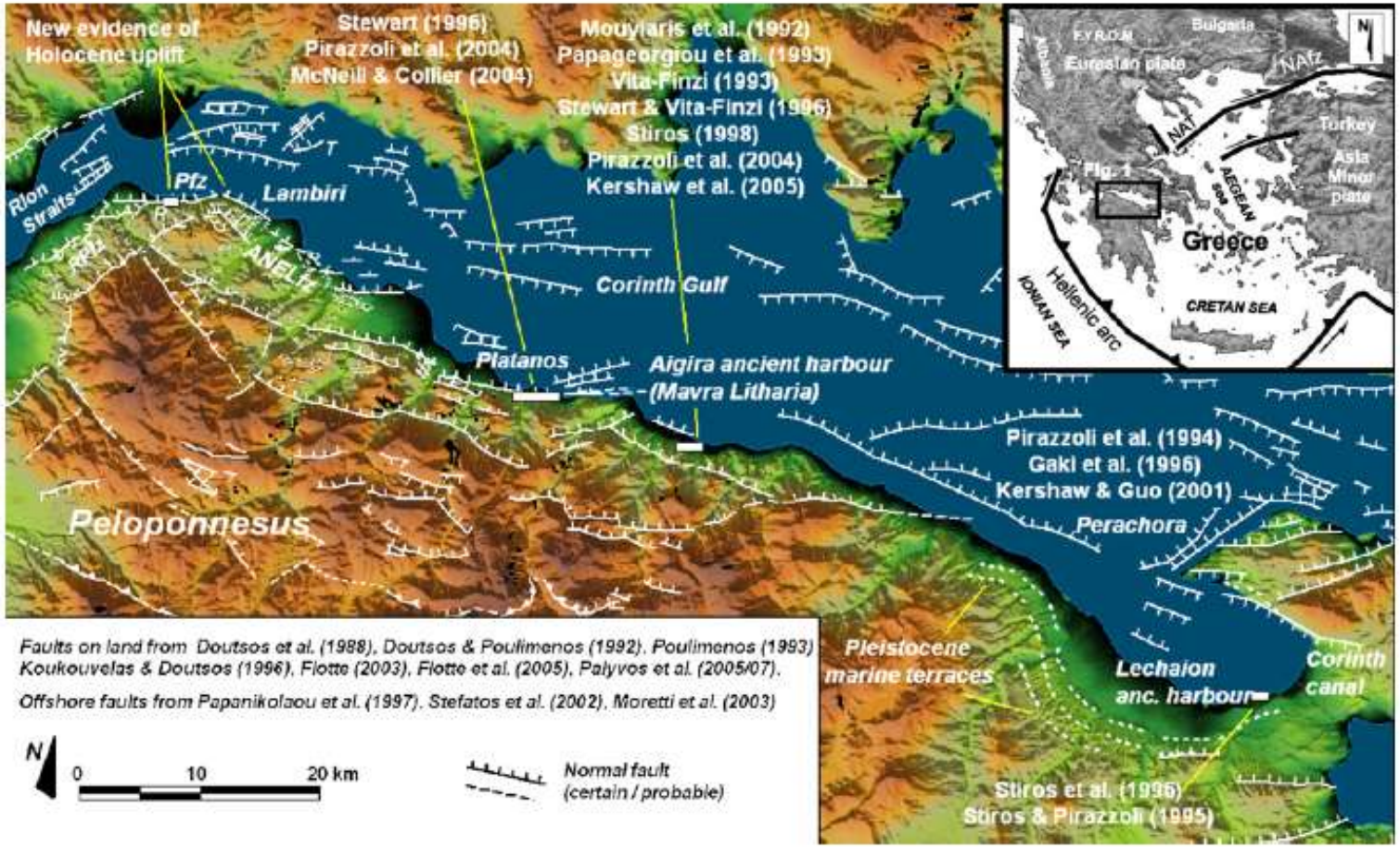
Σεισμική πηγή - Ρήγμα



Γεωλογική, Νεοτεκτονική χαρτογράφηση
Γεωμετρία, ενεργό, μη ενεργό, πιθανά ενεργό ….

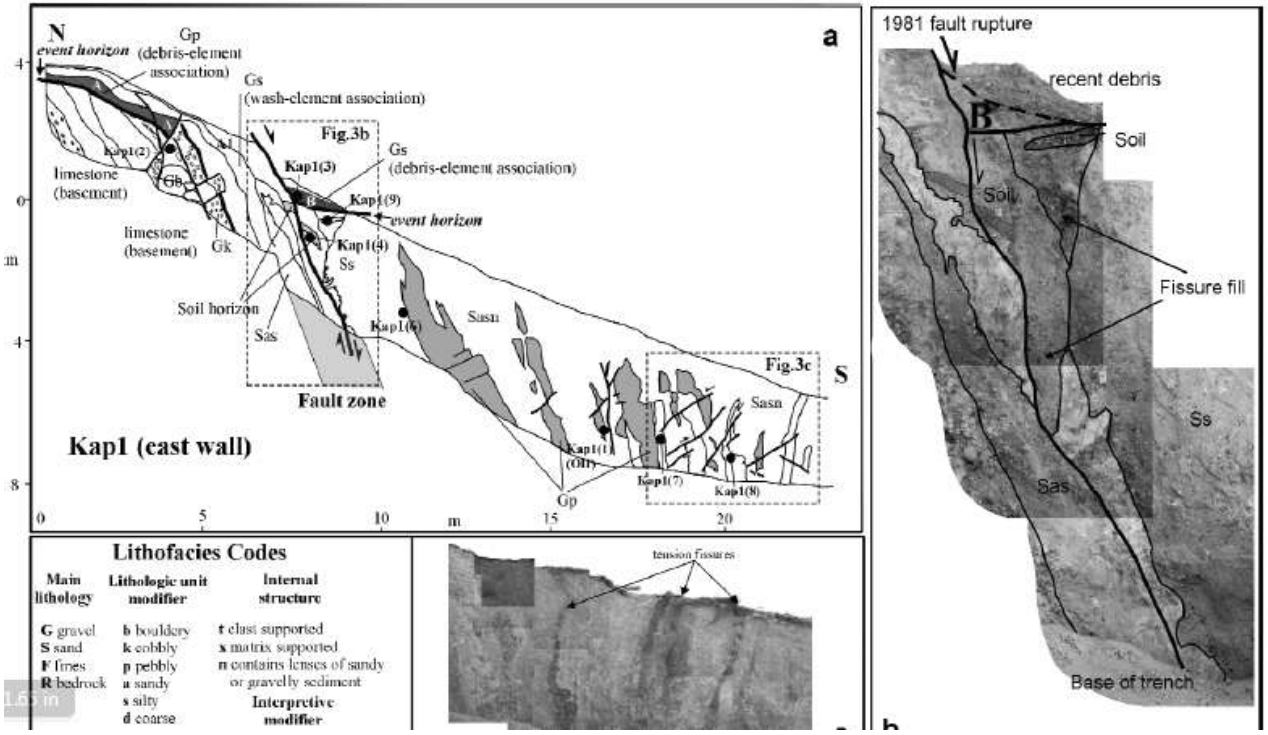
ΝΕΟΤΕΚΤΟΝΙΚΟΣ ΧΑΡΤΗΣ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ
Φύλλο ΓΡΕΒΕΝΑ, Λέκκας κ.ά. 1996

Σεισμική πηγή - Ρήγμα



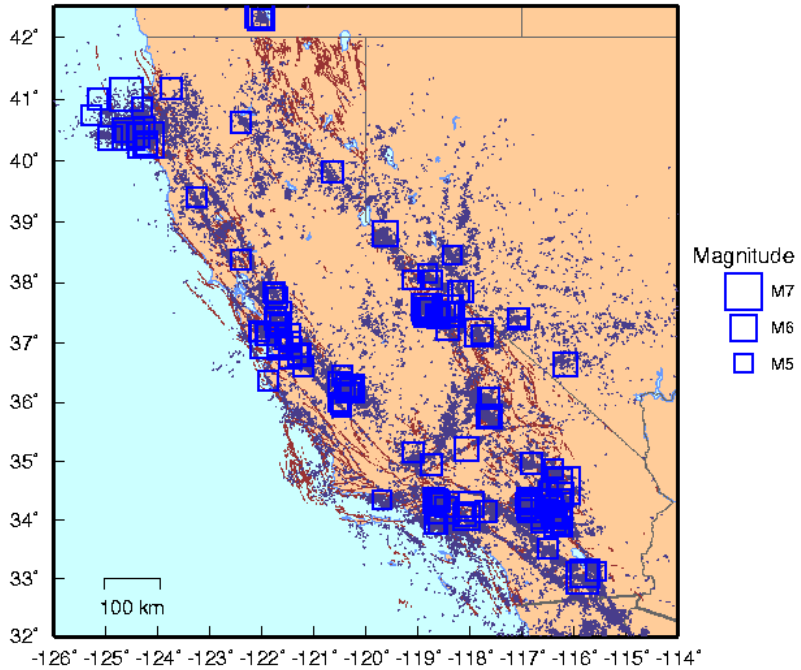
Palyvos et al, 2008

Σεισμική πηγή – Παλαιοσεισμολογικές τομές

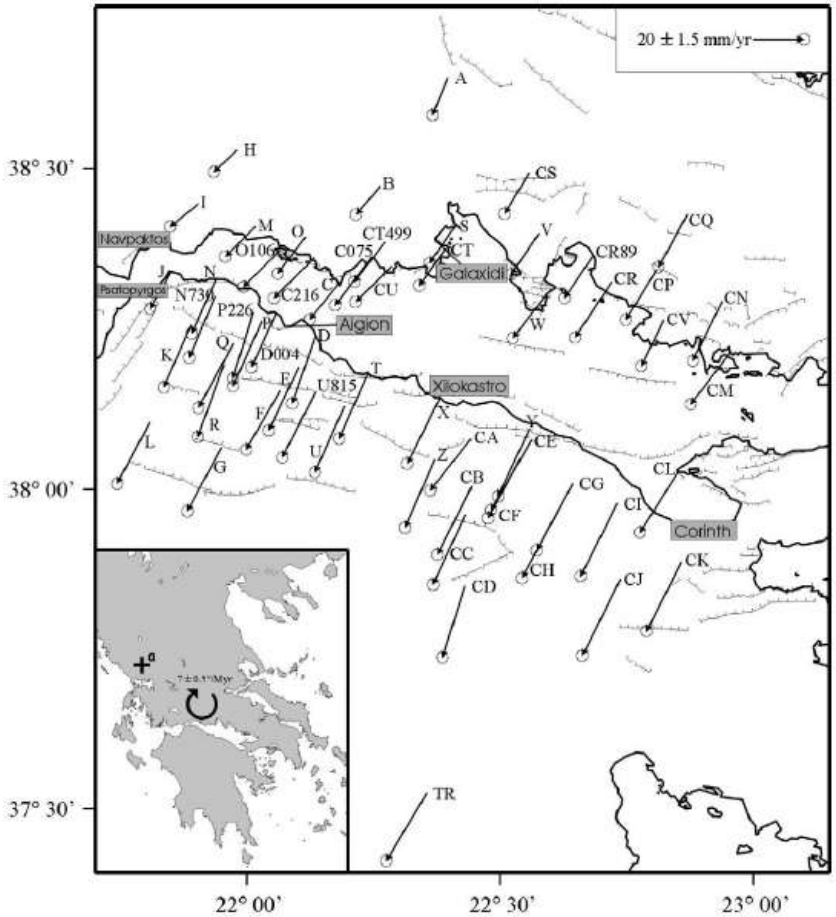


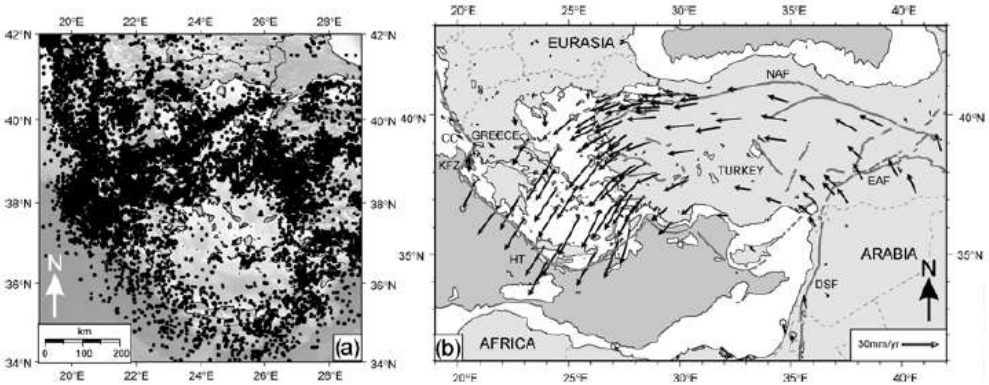
Kokkalas et al, 2007

Σεισμική πηγή – Συνδυασμός σεισμολογικών (σεισμικός κατάλογος) – Γεωλογικών δεδομένων



Σεισμική πηγή – Συνδυασμός σεισμολογικών – Γεωλογικών δεδομένων - Γεωδαισία

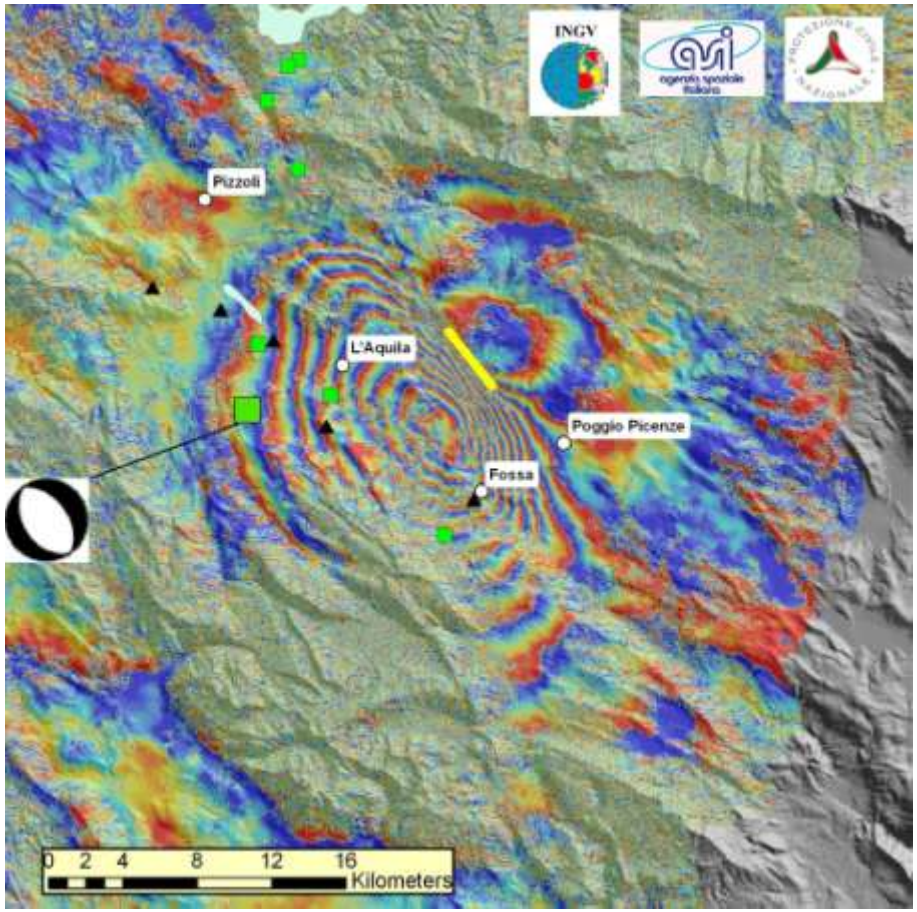




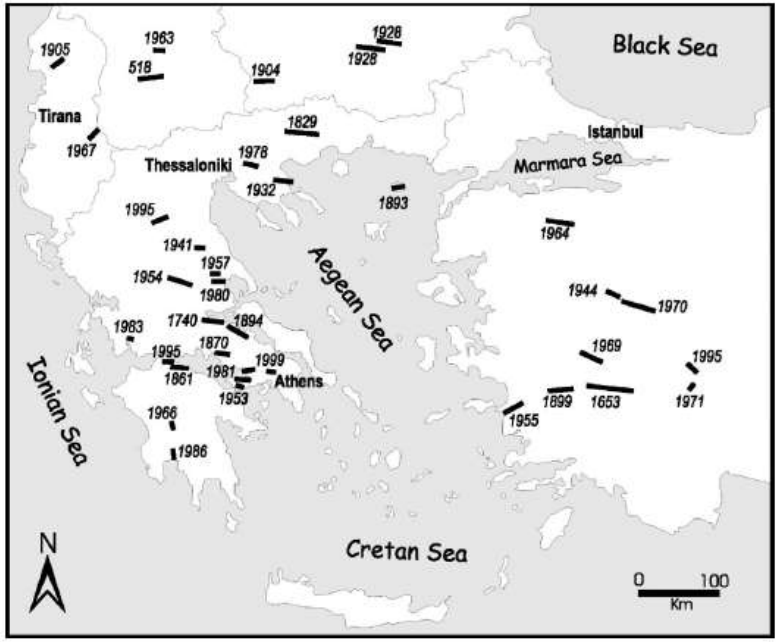
Goldsworthy et al, 2002

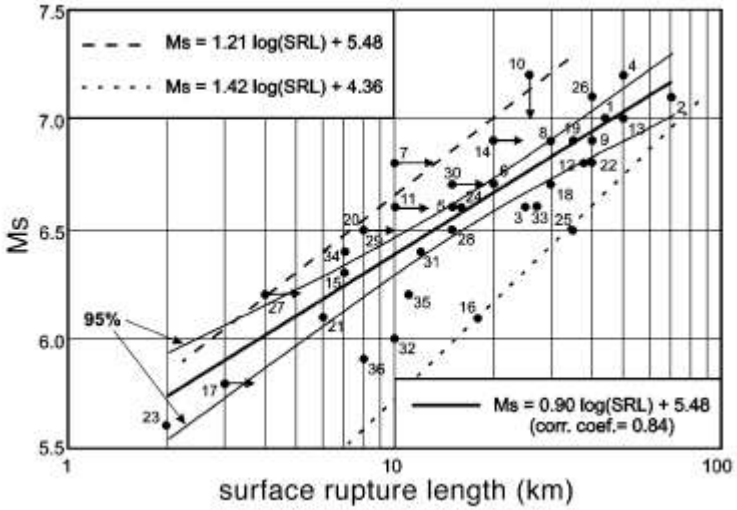
Avallone et al, 2004

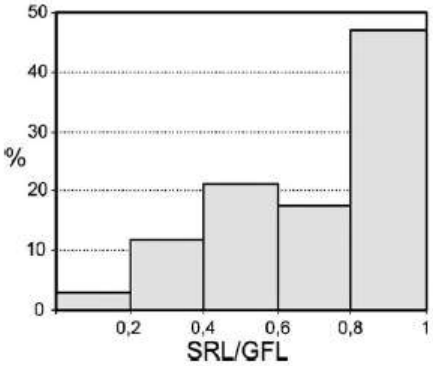
Σεισμική πηγή – Συνδυασμός σεισμολογικών – Γεωλογικών δεδομένων - Γεωδαισία

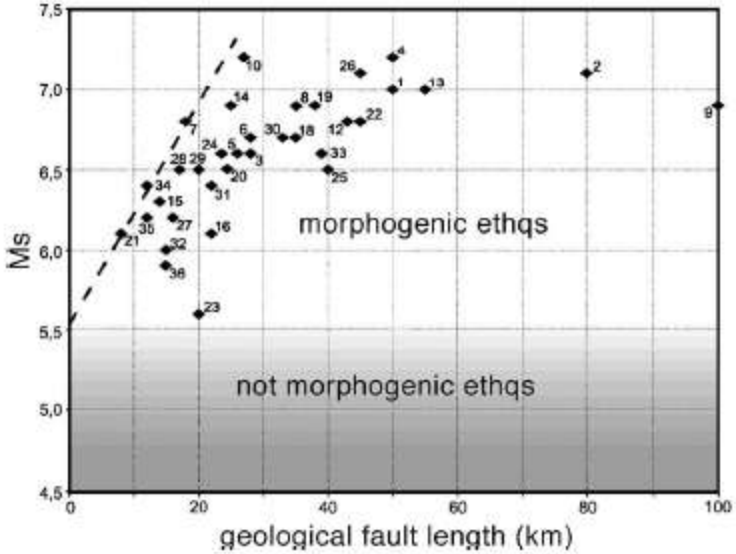


Εμπειρικές σχέσεις





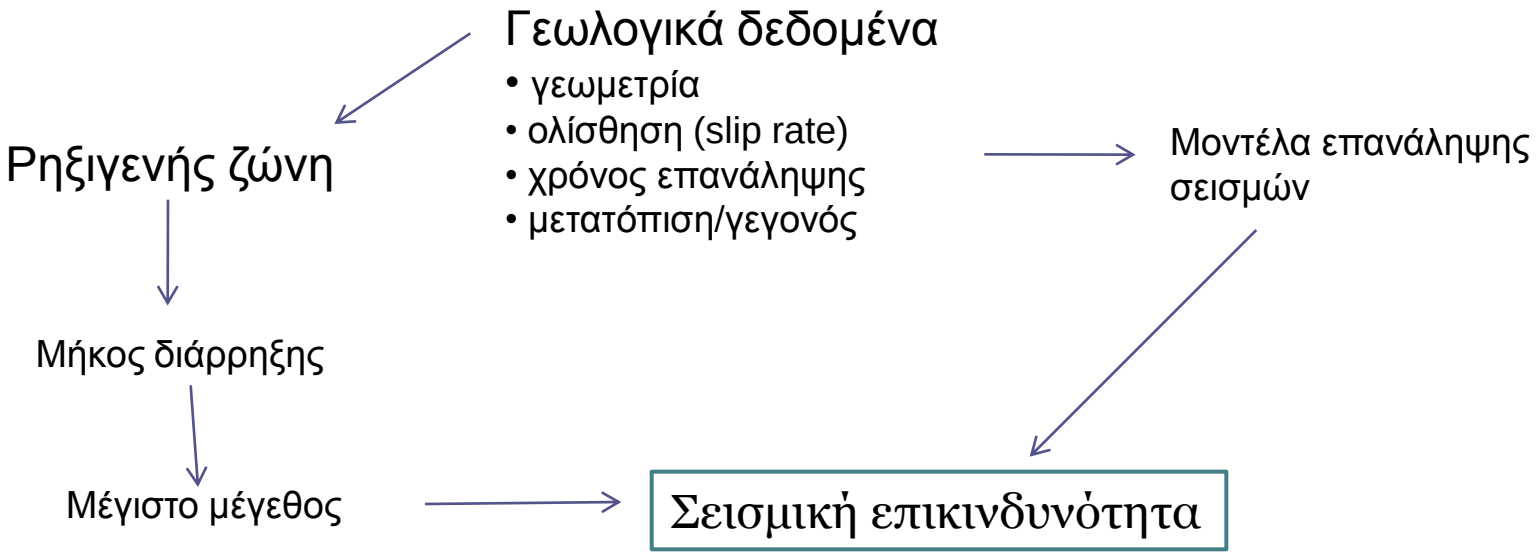




Pavlides and Caputo, 2004

Σύνοψη

- Η γεωλογική έρευνα μπορεί να προσφέρει σημαντικά δεδομένα στην διαδικασία υπολογισμού της σεισμικής επικινδυνότητας σε σχέση με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ρηγμάτων (σεισμικών πηγών) καθώς και του σεισμικού δυναμικού

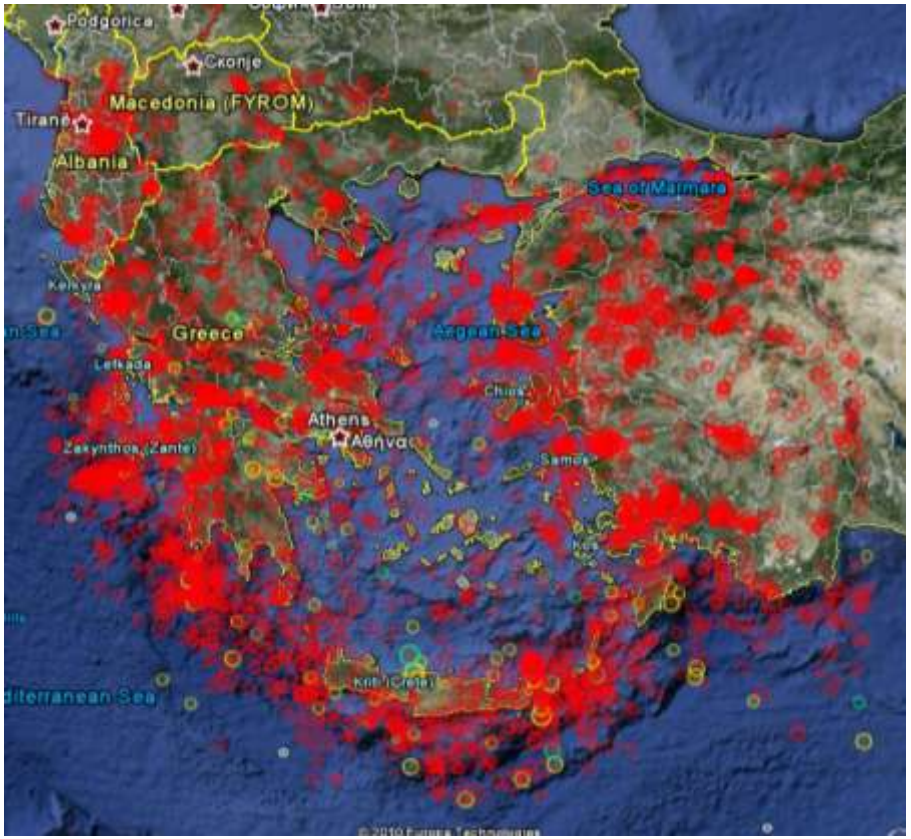


Σεισμολογική παρατήρηση

- Γεωμετρία των σεισμικών πηγών, ρήγματα
- Μέγιστο μέγεθος
- Μοντέλα επανάληψης σεισμών

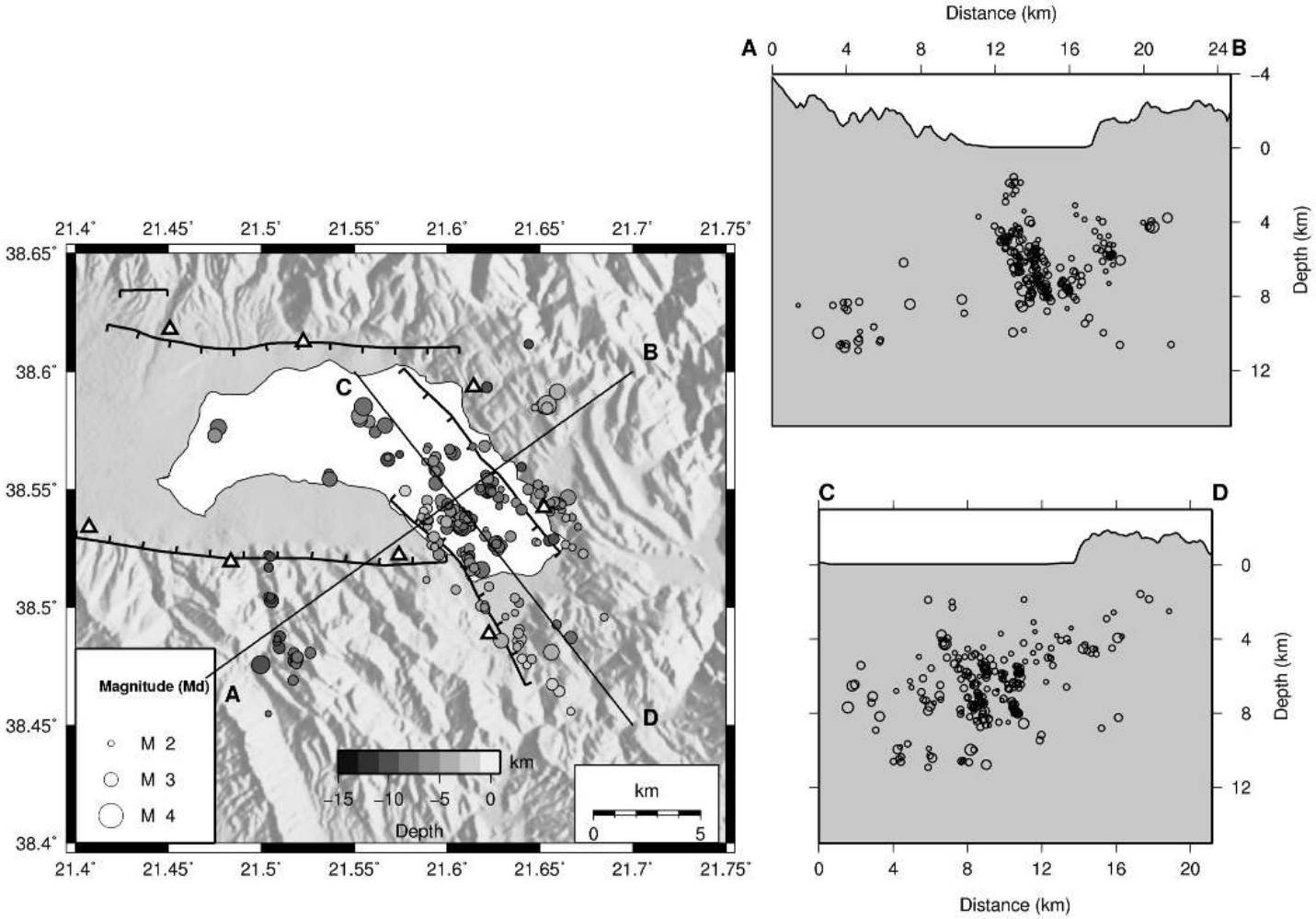
Σεισμολογική παρατήρηση

http://geophysics.geo.auth.gr/ss/



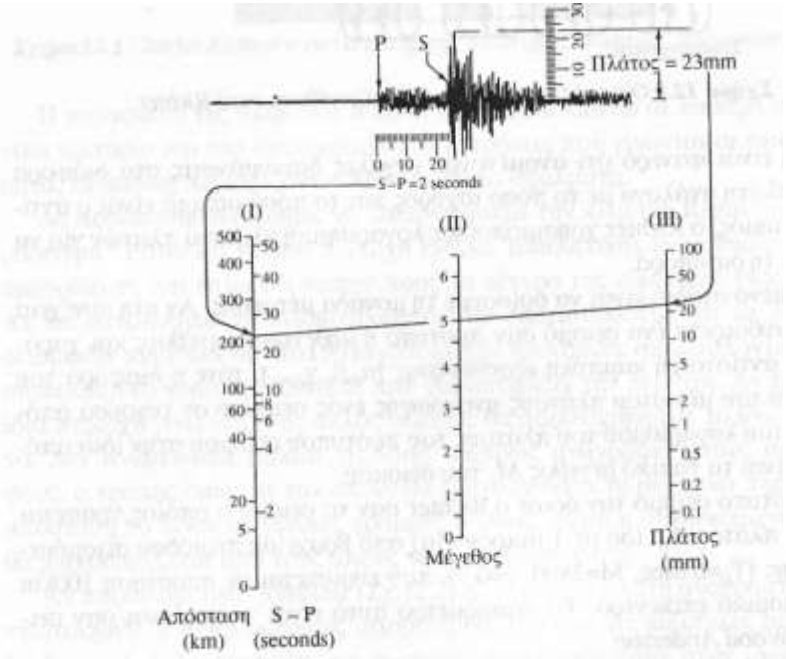
http://www.emsc-csem.org/#2

Σεισμολογική παρατήρηση

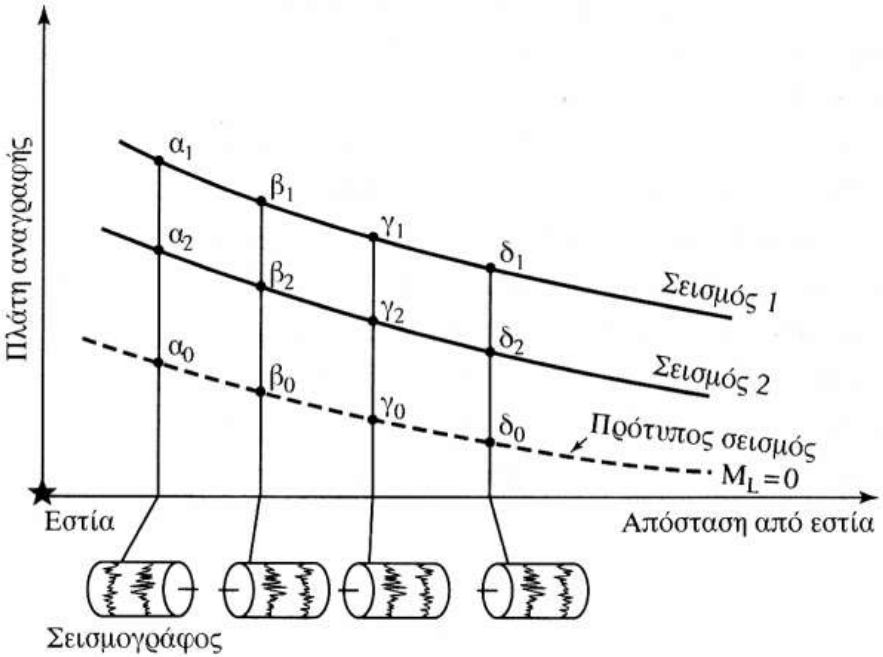


Sokos et al, 2010

Κλίμακες μεγεθών



Σχήμα 12.3 *Νομόγραμμα για τον γρήγορο υπολογισμό του τοπικού μεγέθους (Bolt 1988).*

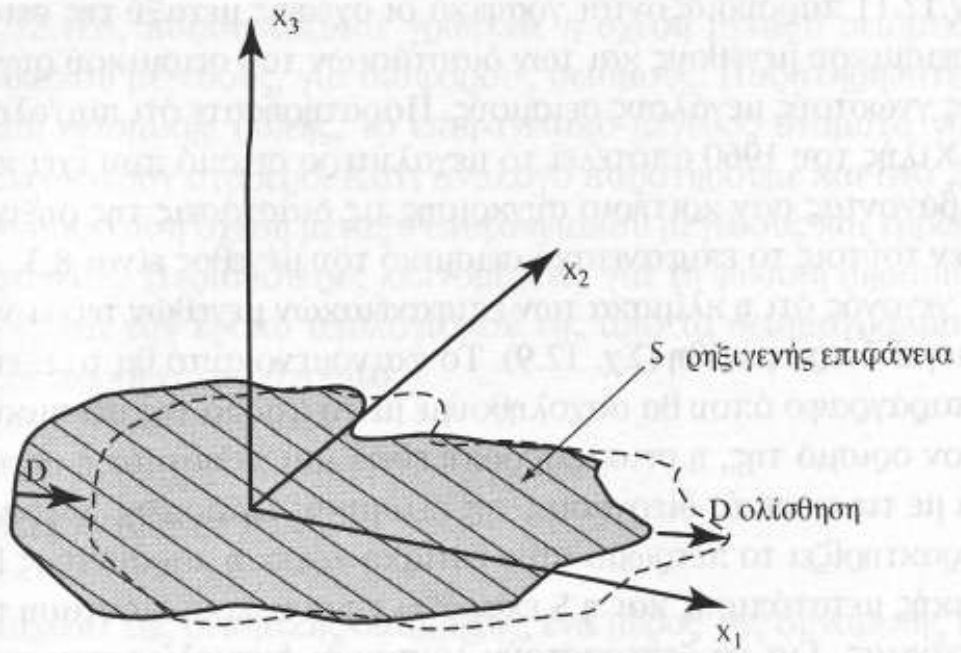


Σχήμα 12.2 *Ορισμός τοπικού σεισμικού μεγέθους κατά Richter.*

$M=\log(A/T)+F(h,\Delta)+C$

Γενική μορφή

Σεισμική Ροπή



Σχήμα 12.10 *Ορισμός της σεισμικής ροπής.*

Ποσότητα που ορίζεται από τη σχέση:

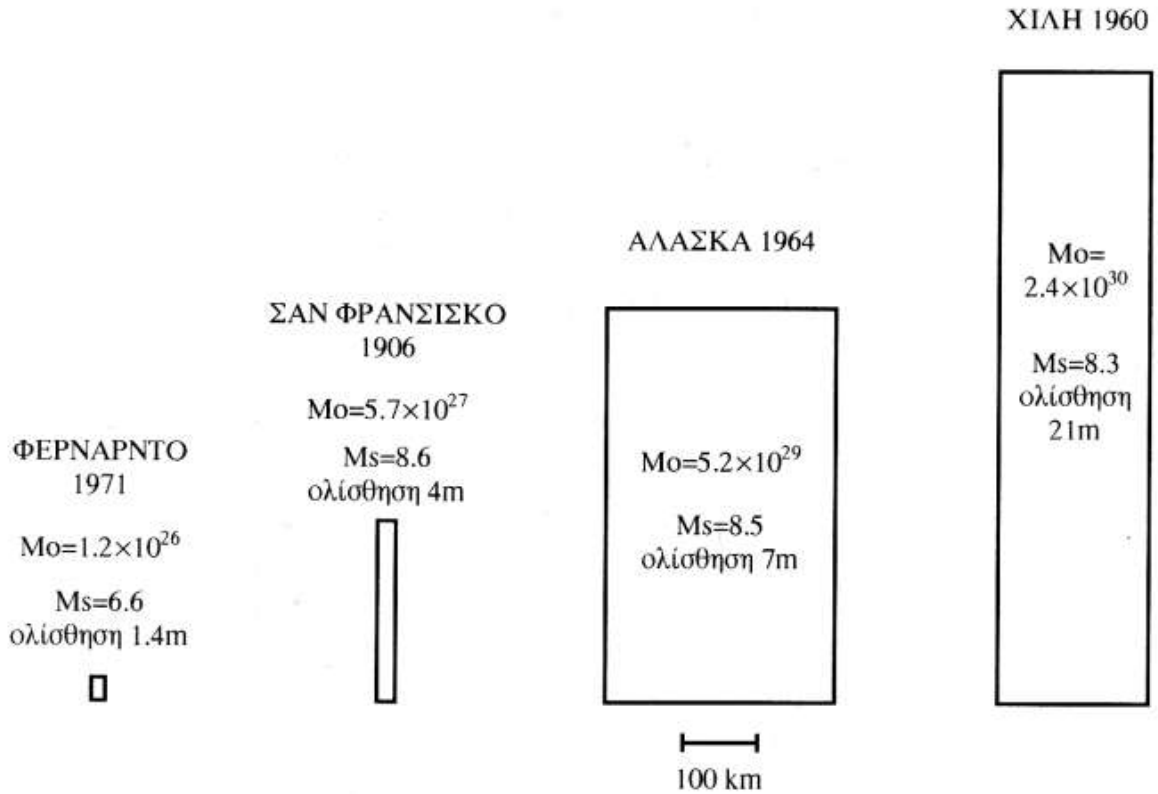
$$M_0=\mu DS$$

Όπου μ είναι ο συντελεστής ακαμψίας του υλικού,

D η μέση σεισμική ολίσθηση

Και S το εμβαδό της ρηξιγενούς επιφάνειας

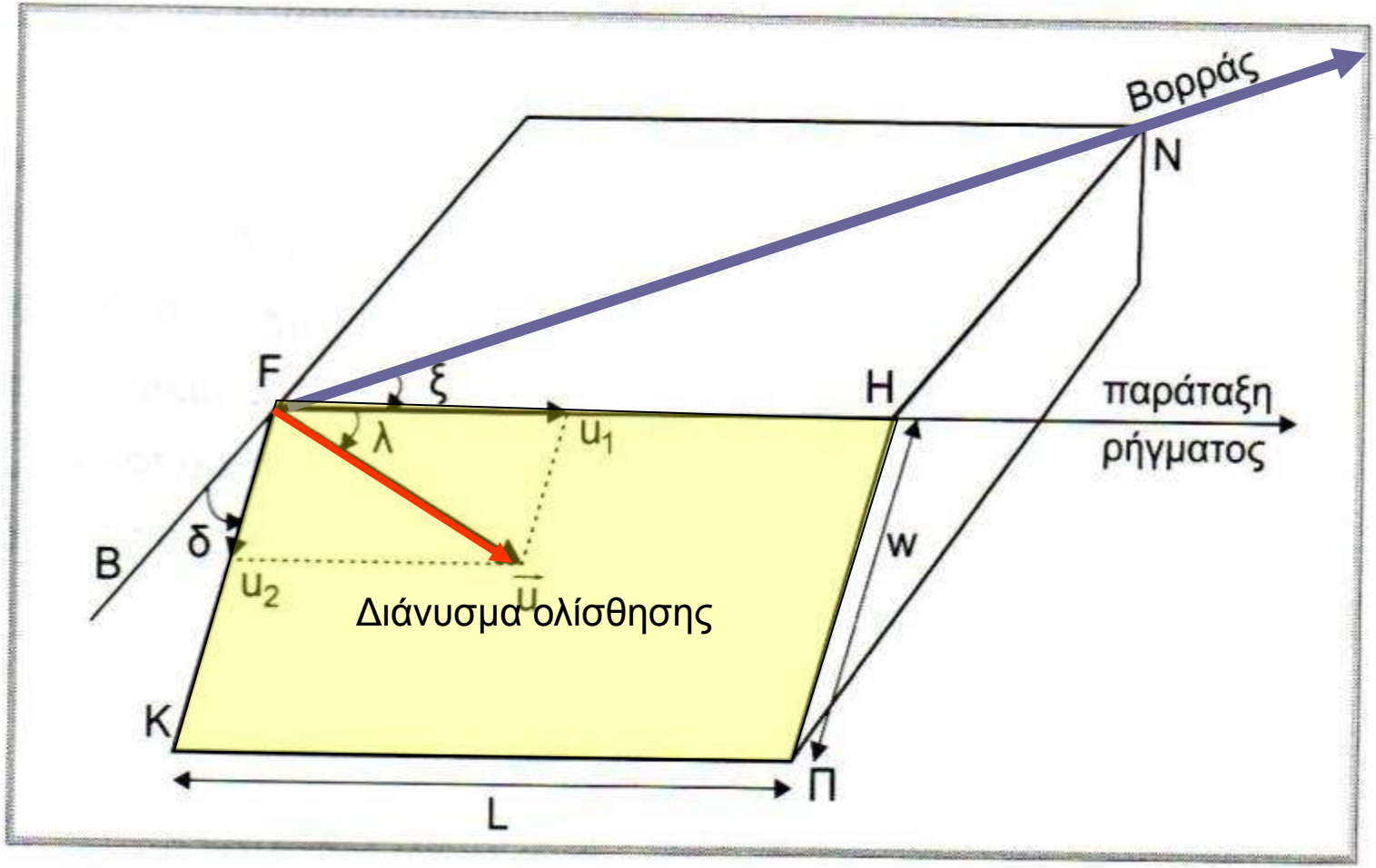
Σεισμική Ροπή



Σχήμα 12.11 *Σύγκριση σεισμικής ροπής, σεισμικού μεγέθους και διαστάσεων ρήγματος για το σεισμό α) του San Fernando (1971), β) του San Francisco (1906), (γ) της Αλάσκας (1964) και δ) της Χιλής (1960).*

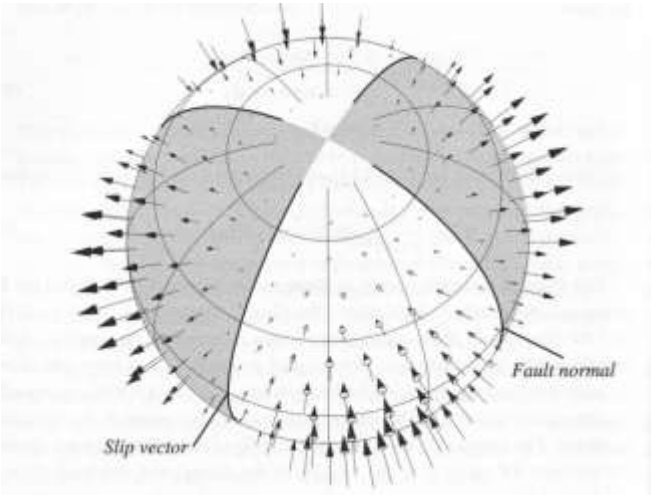
$$M_w = \frac{2}{3}\left(\log_{10}\frac{M_0}{\mathrm{N}\cdot\mathrm{m}} - 9.1\right) = \frac{2}{3}\left(\log_{10}\frac{M_0}{\mathrm{dyn}\cdot\mathrm{cm}} - 16.1\right),$$ Kanamori 1979

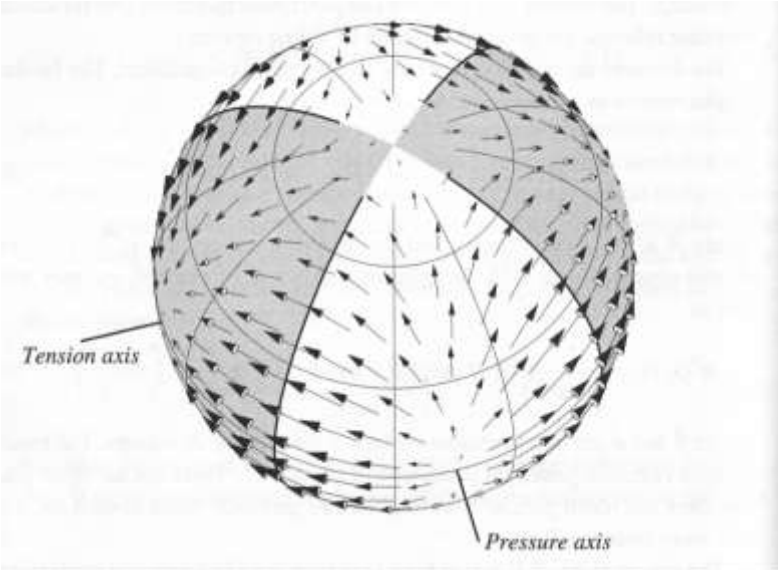
Γεωμετρία του σεισμικού ρήγματος

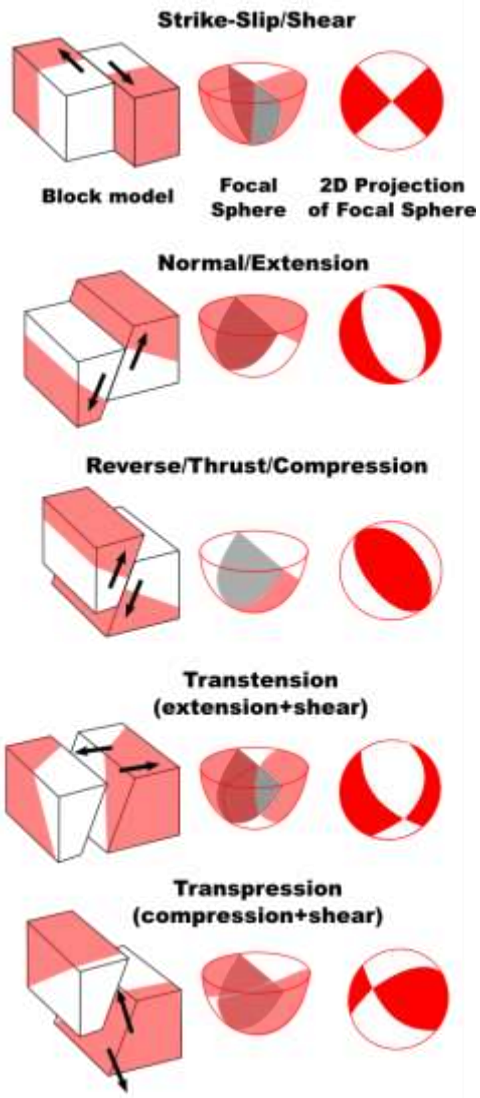


ξ-αζιμούθιο (διεύθυνση,strike) δ-κλίση(dip) λ-γωνία ολίσθησης (rake)

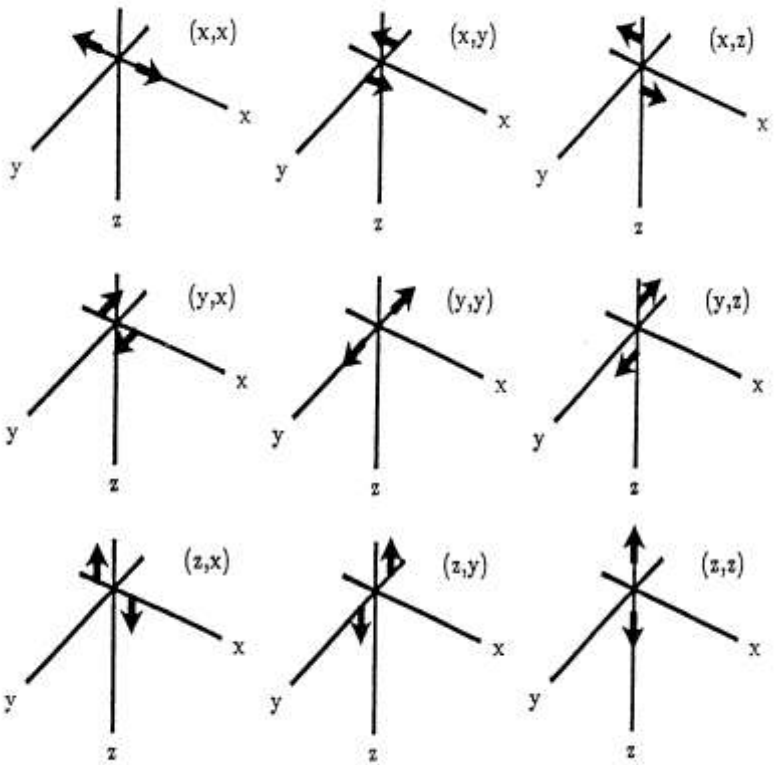
Γεωμετρία του σεισμικού ρήγματος







Τανυστής της Σεισμικής Ροπής (Seismic Tensor)

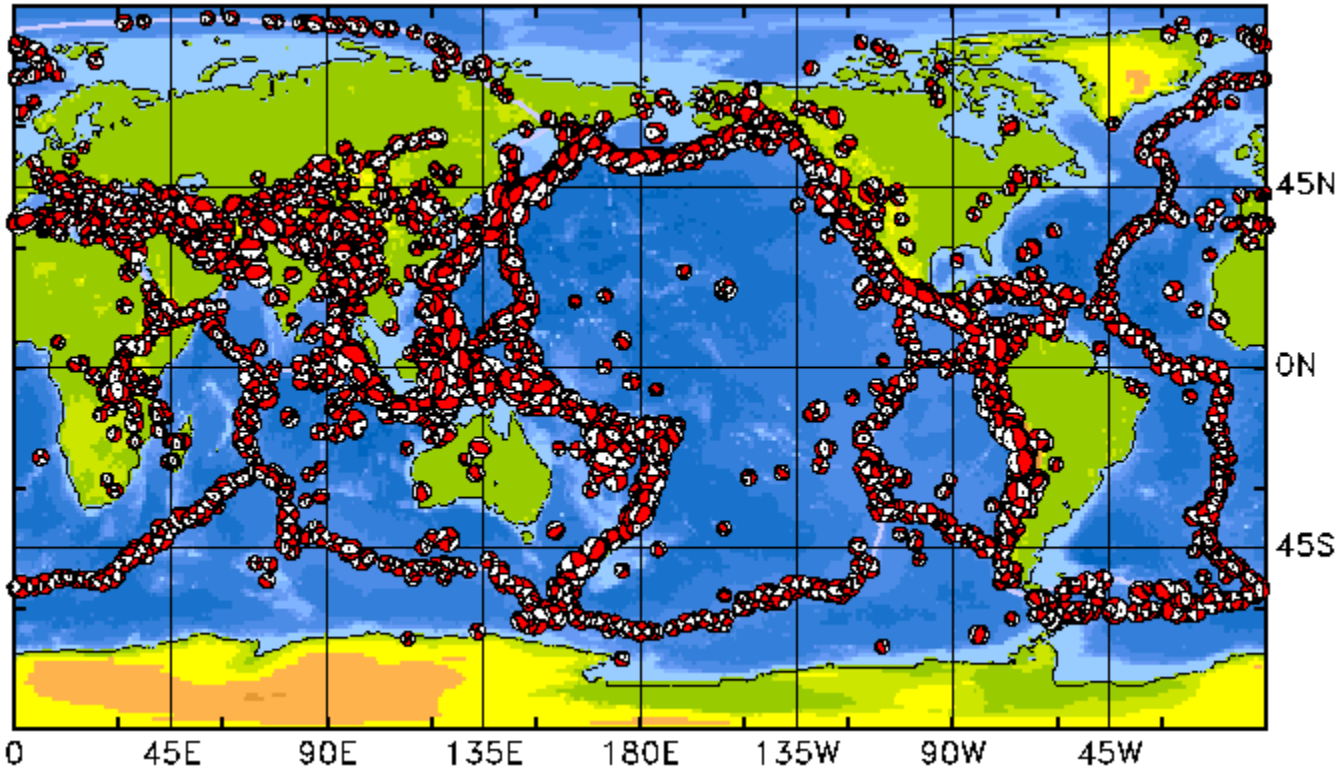


$M_{xx} = - M_o(\sin\delta \cos\lambda \sin 2\phi + \sin 2\delta \sin\lambda \sin^{2\phi})$
$M_{xy} = M_o(\sin\delta \cos\lambda \cos 2\phi + 0.5 \sin 2\delta \sin\lambda \sin 2\phi)$
$M_{xz} = - M_o(\cos\delta \cos\lambda \cos\phi + \cos 2\delta \sin\lambda \sin\phi)$ (7)
$M_{yy} = M_o(\sin\delta \cos\lambda \sin 2\phi - \sin 2\delta \sin\lambda \cos^{2\phi})$
$M_{yz} = - M_o(\cos\delta \cos\lambda \sin\phi - \cos 2\delta \sin\lambda \cos\phi)$
$M_{zz} = Mo \sin 2\delta \sin\lambda$

Μο η σεισμική ροπή, φ η διεύθυνση, δ η κλίση και λ η γωνία ολίσθησης του ρήγματος

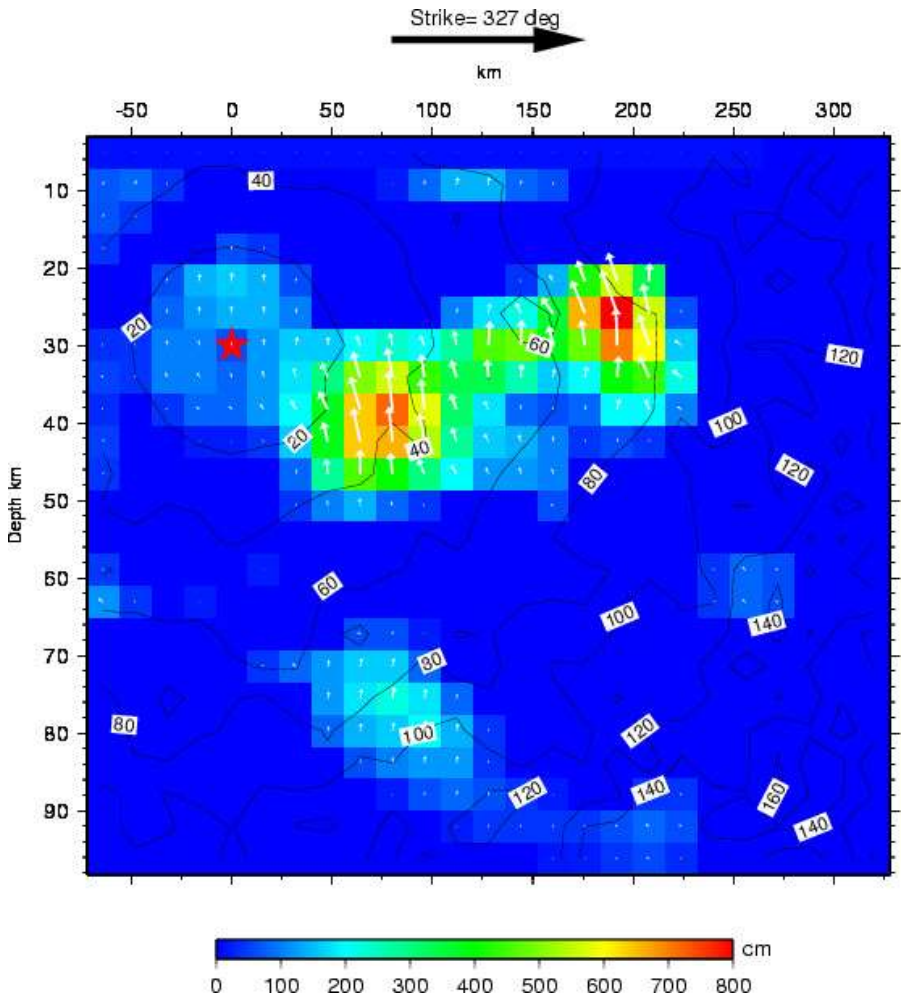
$$M = \begin{bmatrix} M_{xx} & M_{xy} & M_{xz} \\ M_{yx} & M_{yy} & M_{yz} \\ M_{zx} & M_{zy} & M_{zz} \end{bmatrix}$$

Αυτόματος προσδιορισμός του τανυστή της σεισμικής ροπής

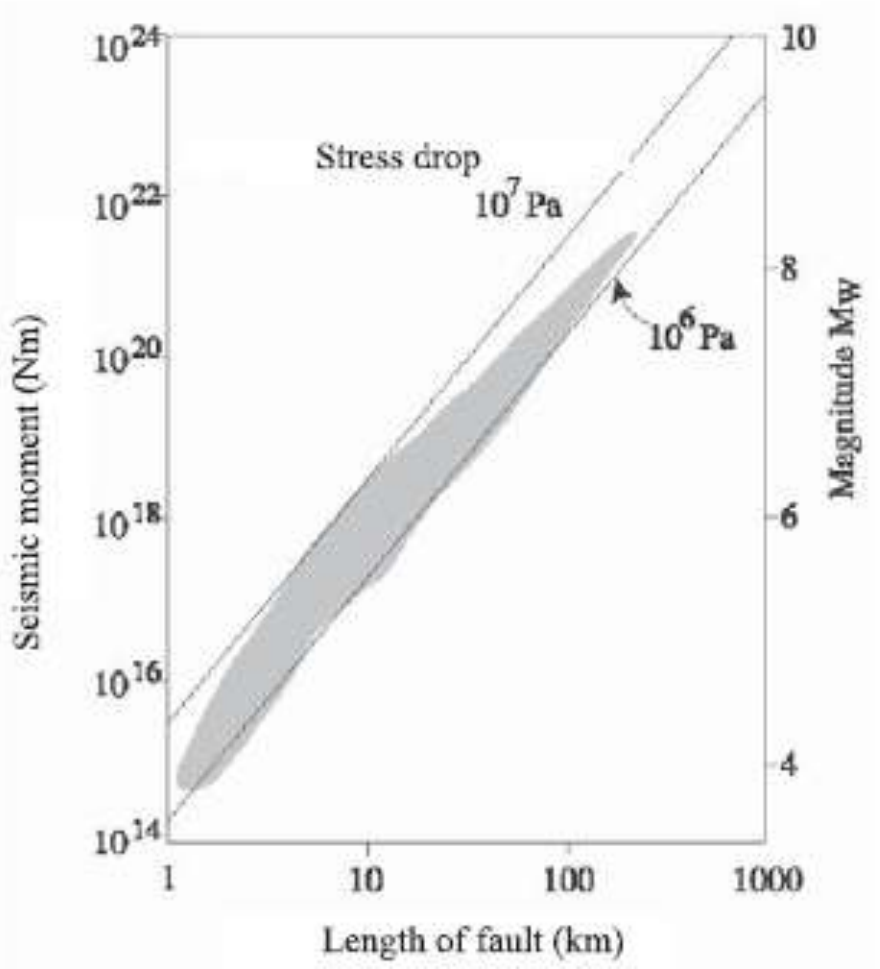


http://www.globalcmt.org/

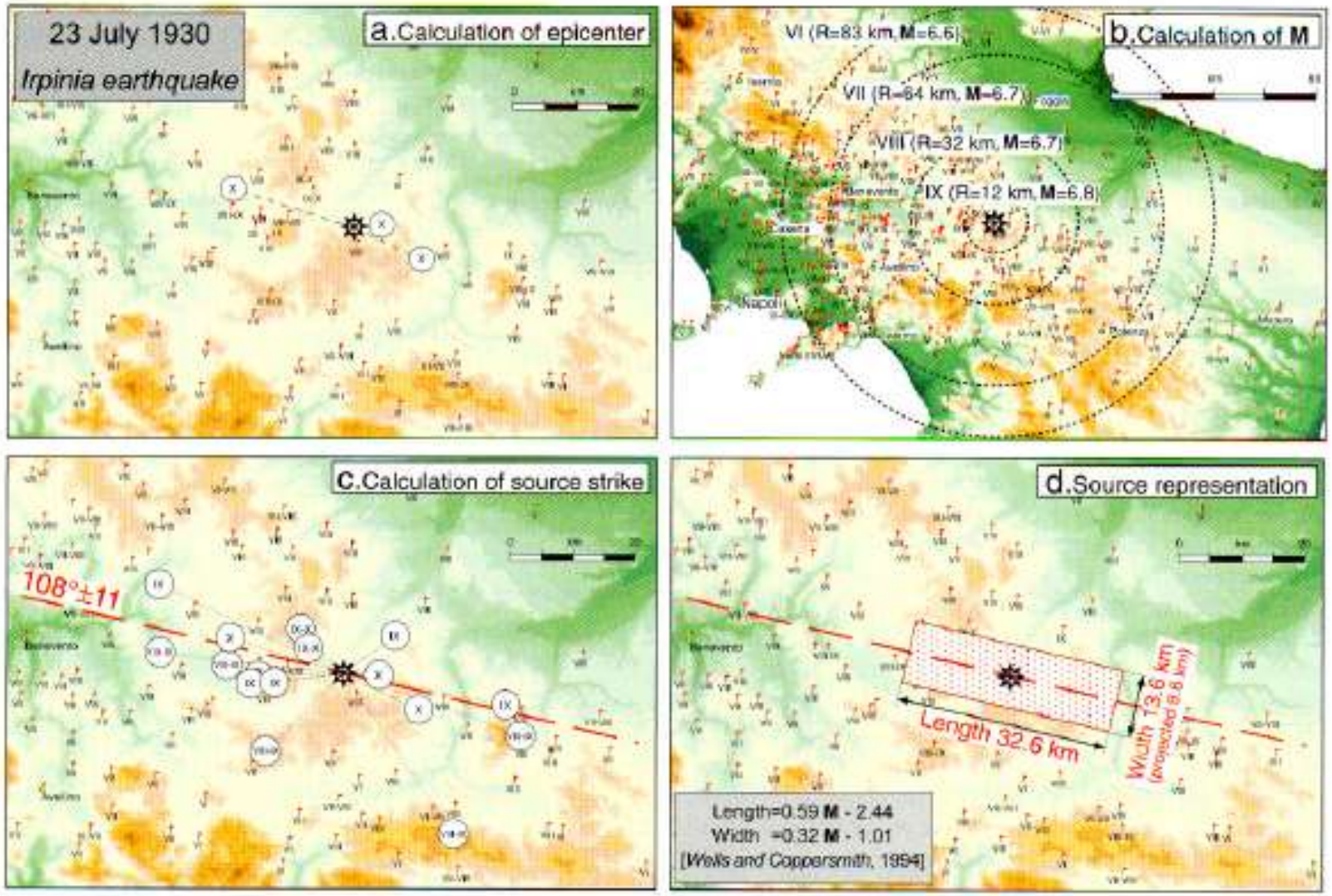
Γεωμετρία του σεισμικού ρήγματος



Μέγεθος της σεισμικής πηγής



Προσδιορισμός χαρακτηριστικών ρήγματος
από δεδομένα σεισμικής έντασης

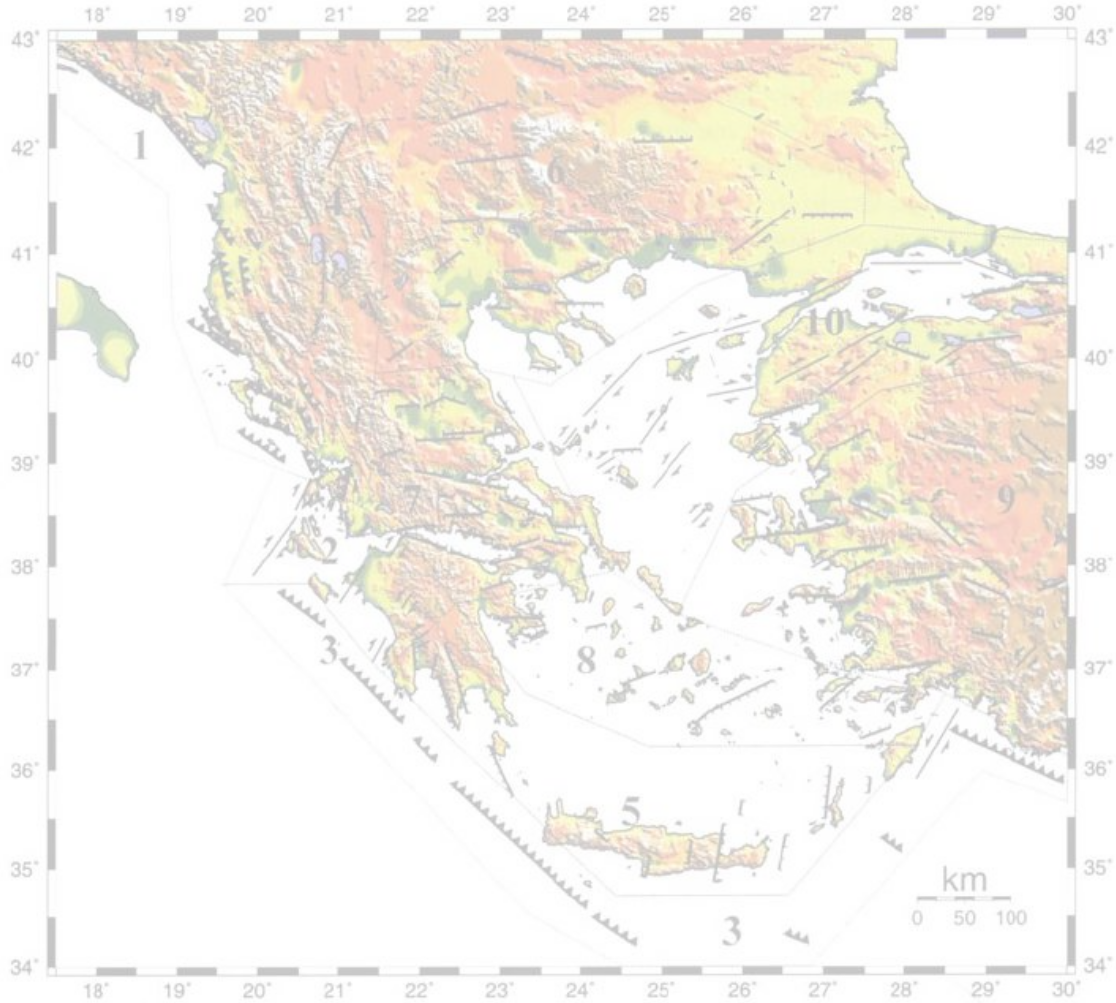


Gasperini et al, 1999

Βάσεις δεδομένων ρηγμάτων

Ιαπωνία:http://riodb02.ibase.aist.go.jp/activefault/index_e.html
Νέα Ζηλανδία: http://data.gns.cri.nz/af/
Ηνωμ.Πολιτείες: http://gldims.cr.usgs.gov/
Ιταλία: http://www.apat.gov.it/site/en-GB/Projects/ITHACA_-_ITaly_HAzards_from_CApable_faults/

Χάρτες ρηγμάτων – Σεισμικών πηγών



Παπαζάχος κ.ά, 2001. Με βάση σεισμολογικά, γεωλογικά, τεκτονικά κριτήρια.

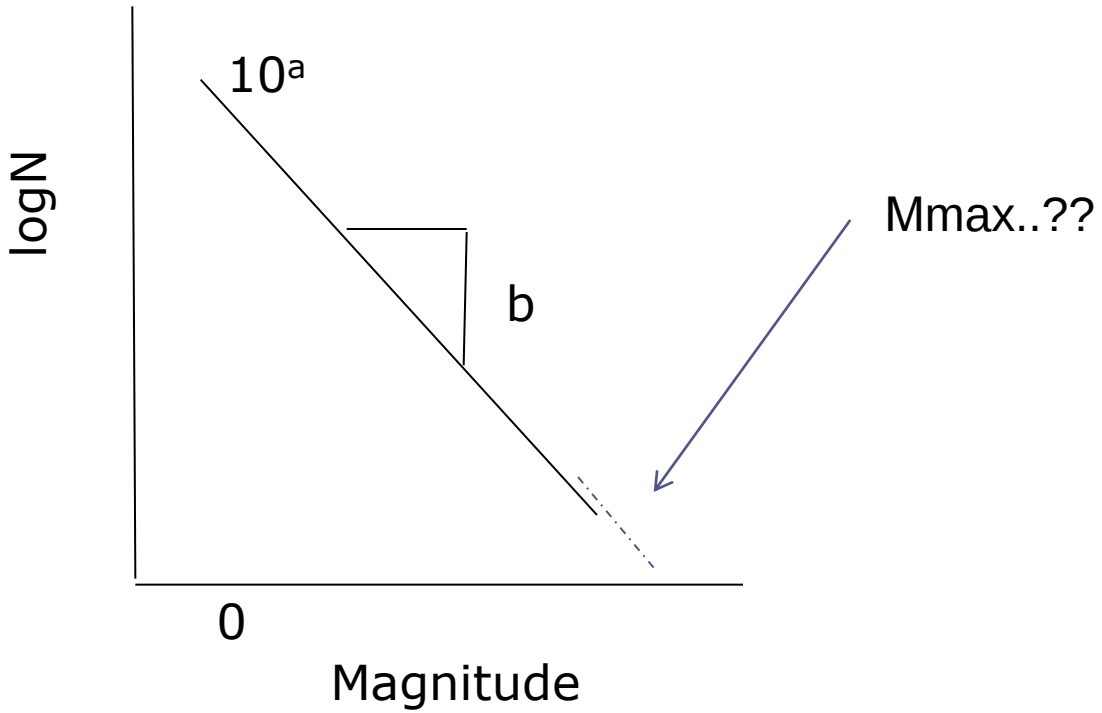
Σεισμικός κατάλογος

- Η βασική συνεισφορά της σεισμολογίας στη μελέτη της σεισμικής επικινδυνότητας
- Επιτρέπει τον υπολογισμό της κατανομής των σεισμικών μεγεθών σε μια περιοχή
- Βασική προϋπόθεση η τεκμηρίωση σε ότι αφορά την πληρότητα και την κλίμακα σεισμικών μεγεθών

Κατανομή των μεγεθών - σχέση Gutenberg – Richter

Gutenberg-Richter: $\log N = a - bM$

- N αριθμός σεισμών μεγαλύτερων από M
- a, b σταθερές



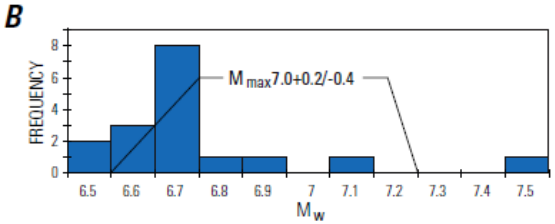
a, b υπολογίζονται από τους σεισμικούς καταλόγους

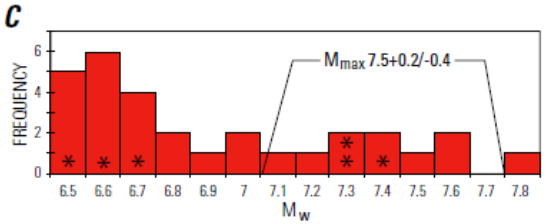
Μέγιστο μέγεθος

- Πρέπει να εκτιμάται με βάση τις γεωλογικές – τεκτονικές μελέτες και όχι με βάση το σεισμικό κατάλογο (πρόβλημα χρονικής διάρκειας/πληρότητας καταλόγου)

- Το μέγιστο μέγεθος προκύπτει χρησιμοποιώντας τις σχέσεις που συνδέουν το μέγεθος με τις διαστάσεις του ρήγματος (π.χ. Wells & Coppersmith ,1994)

- Μπορεί επίσης να προκύψει και από συγκριτικές μελέτες σε παρόμοια γεωτεκτονικά περιβάλλοντα (Petersen et al,2008)



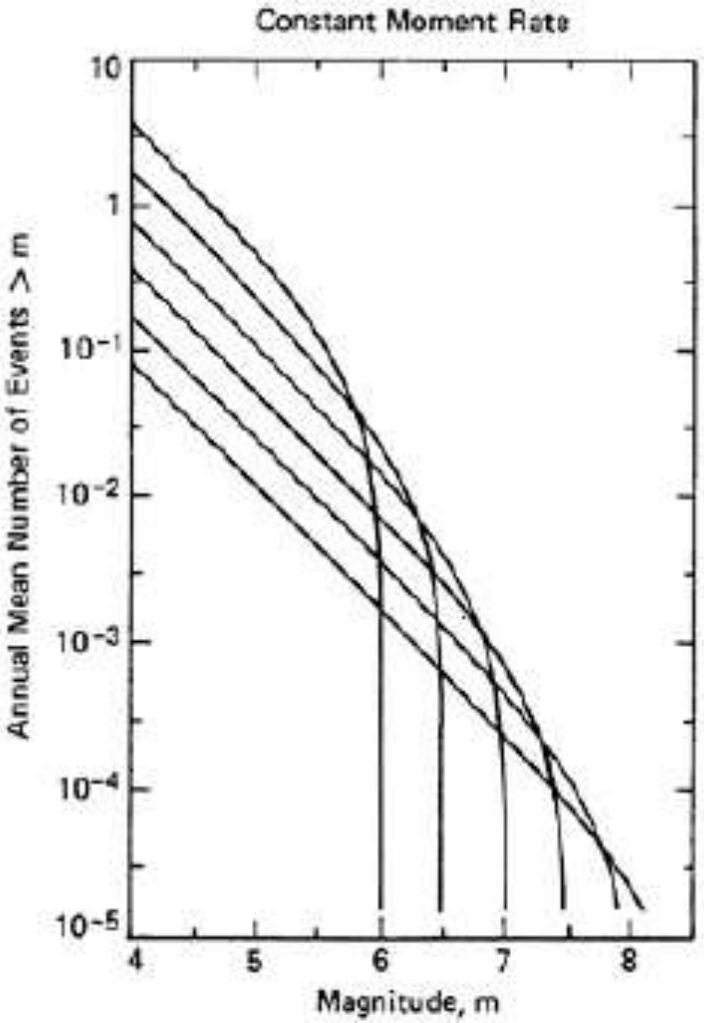


Μέγιστο μέγεθος

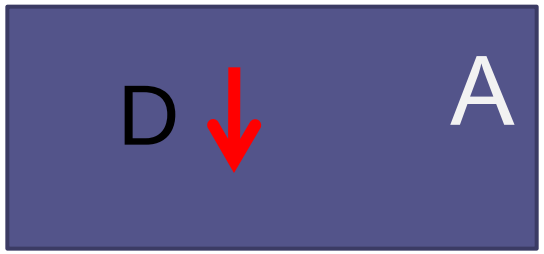
- Ανάλογα με την ανάλυση μπορεί να υπάρχουν διαφορετικά «μέγιστα μεγέθη»..!
- π.χ. «πιθανότερο μέγιστο μέγεθος», προκύπτει από ανάλυση της σεισμικότητας και μπορεί να θεωρηθεί σαν άνω όριο
- «Μέγιστο αληθοφανές μέγεθος», το λογικά αναμενόμενο με βάση τα στοιχεία
- «Μέγιστο ιστορικό μέγεθος», με βάση το σεισμικό κατάλογο, μπορεί να καθορίζει ένα κάτω όριο αλλά ίσως και όχι.

Μέγιστο μέγεθος

Επίδραση του μέγιστου μεγέθους στον αριθμό των σεισμών μιας σεισμικής πηγής



Μοντέλα επανάληψης σεισμών – Σύνδεση ρυθμού ολίσθησης με αριθμό σεισμών στο ρήγμα



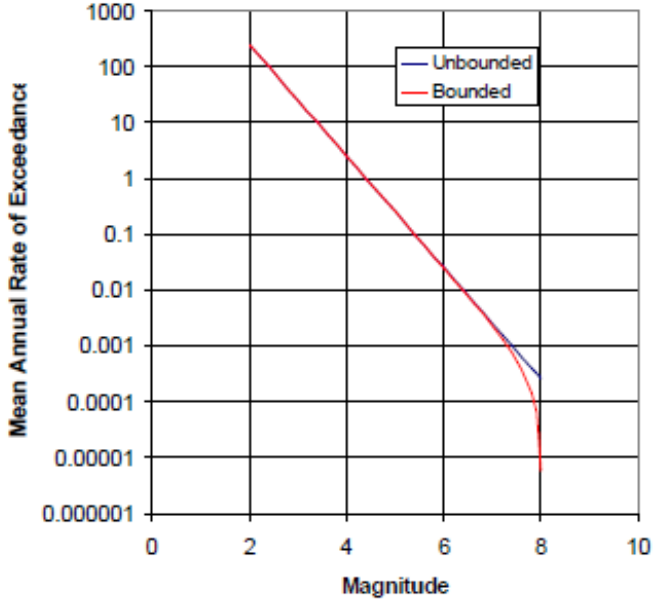
$$M_0=\mu AD$$

$$M^T_0=\mu AS$$

S – ετήσια ολίσθηση στο ρήγμα,
M^T_0 - ετήσια έκλυση ροπής

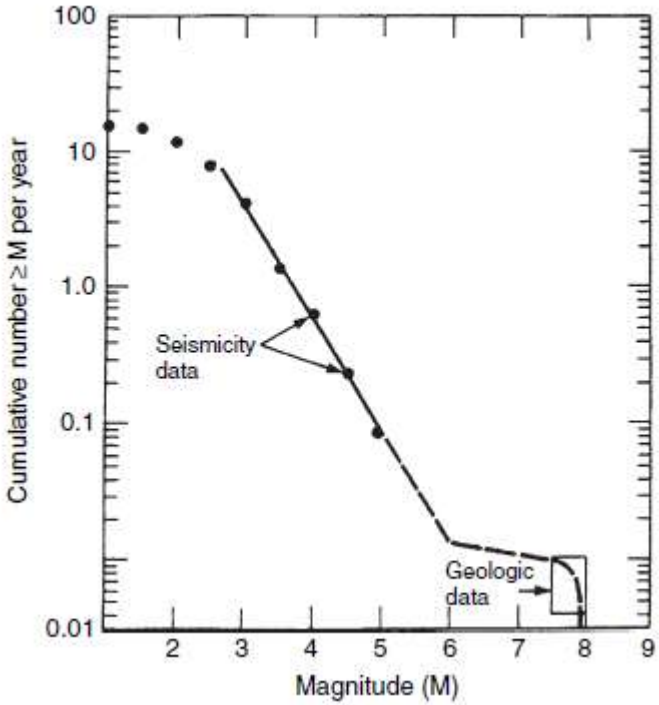
* Θεωρούμε ότι δεν υπάρχει ασεισμική κίνηση του ρήγματος

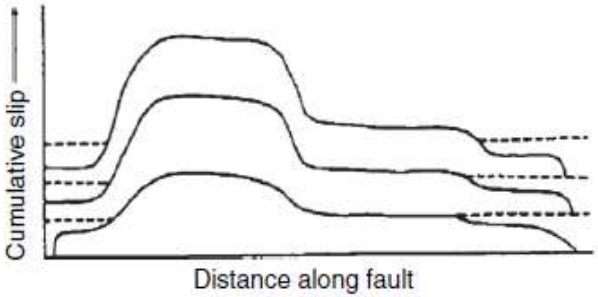
Μοντέλα επανάληψης σεισμών



Gutenberg –Richter φραγμένη ως προς το άνω και κάτω όριο

Μοντέλο χαρακτηριστικού σεισμού Schwartz and Coppersmith ,1984





Μοντέλα επανάληψης σεισμών

$$N(M) = 10^{(a_1 - bM)} H(M_{\max} - M),$$

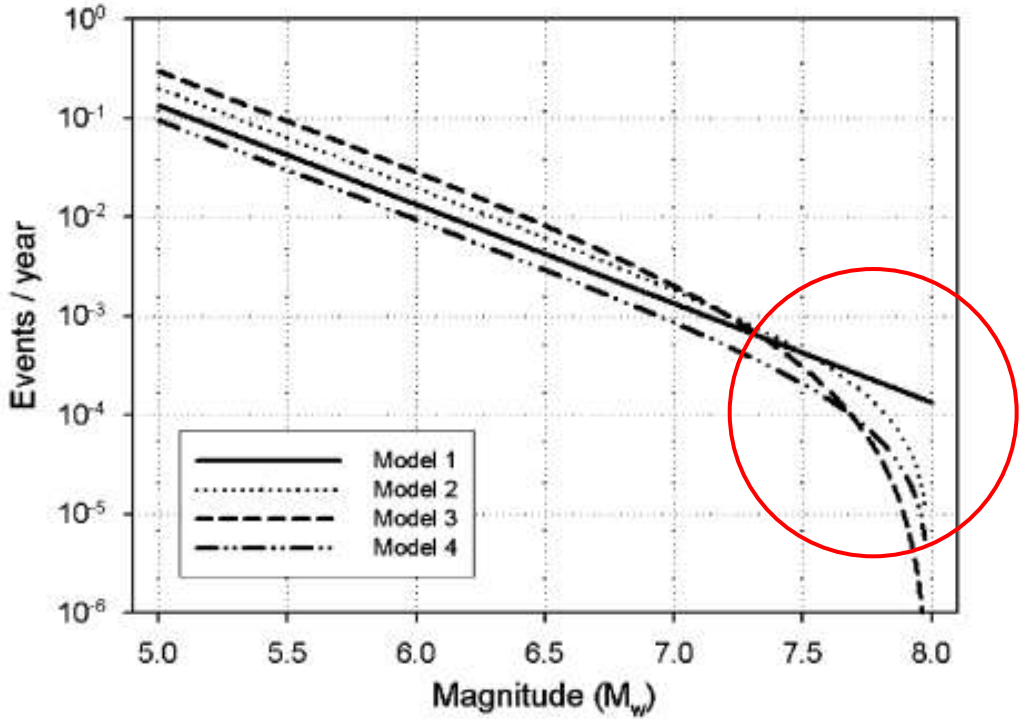
Gutenberg –Richter
φραγμένη ως προς το άνω
και κάτω όριο

$$N_4(m^0) = \frac{\mu A_f S(d-b)[1 - e^{-\beta(m^u - m^0)}]}{b M_0^u e^{-\beta(m^u - m^0)}},$$

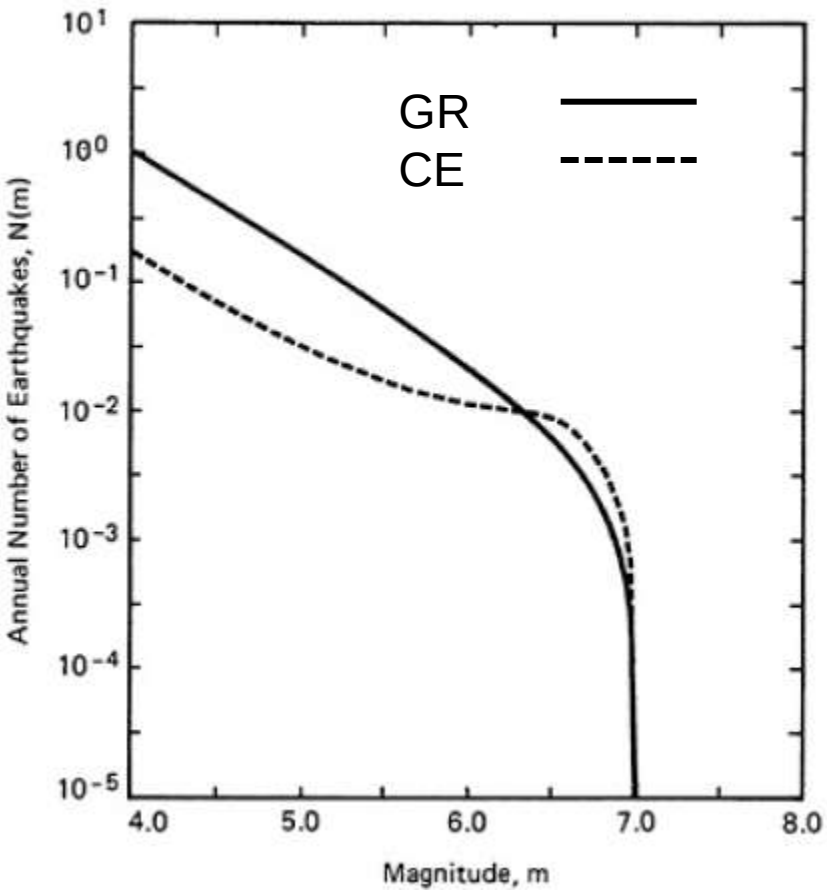
Youngs and Coppersmith (1985),

$$N_3(M) = \frac{\bar{d}(\bar{d} - \bar{b})}{\bar{b}} \left(\frac{S}{\beta}\right) \left\{ \frac{1}{\bar{b}} \left[e^{\bar{b}(M_{\max} - M)} - 1 \right] - (M_{\max} - M) \right\} e^{-((\bar{d}/2)M_{\max})}.$$

Anderson and Luco (1983)



Κατανομή σεισμών - Πιο μοντέλο ..?



GR vs Μοντέλο χαρακτηριστικού σεισμού

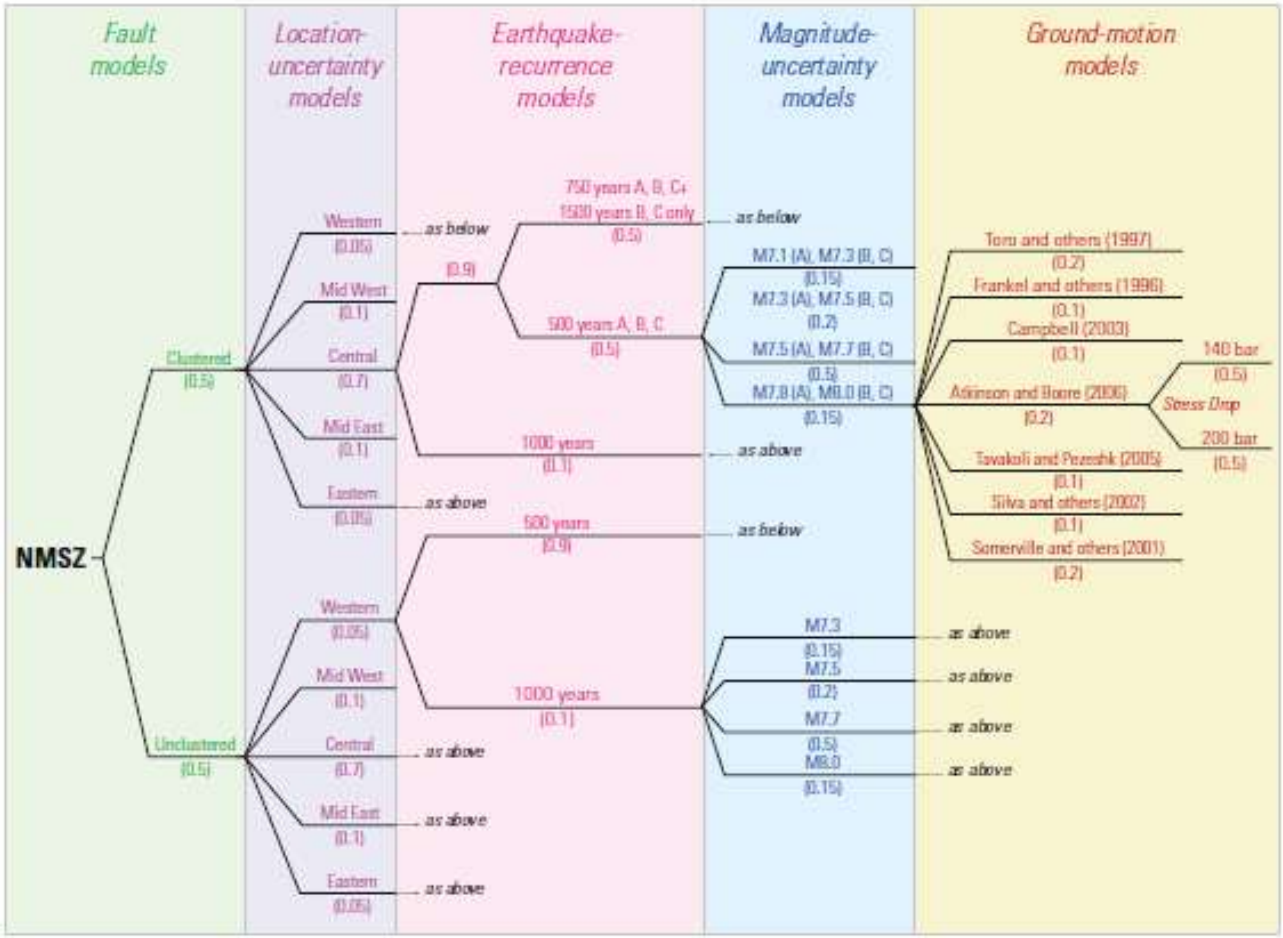
Γενικά

- Η χρήση του μοντέλου των GR προτιμάται σε περιοχές σεισμικών ζωνών
- Ενώ η χρήση του μοντέλου του χαρακτηριστικού σεισμού σε περιπτώσεις εφαρμογής σε συγκεκριμένο ρήγμα

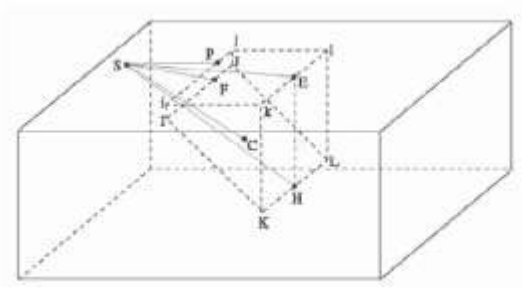
Σύνοψη

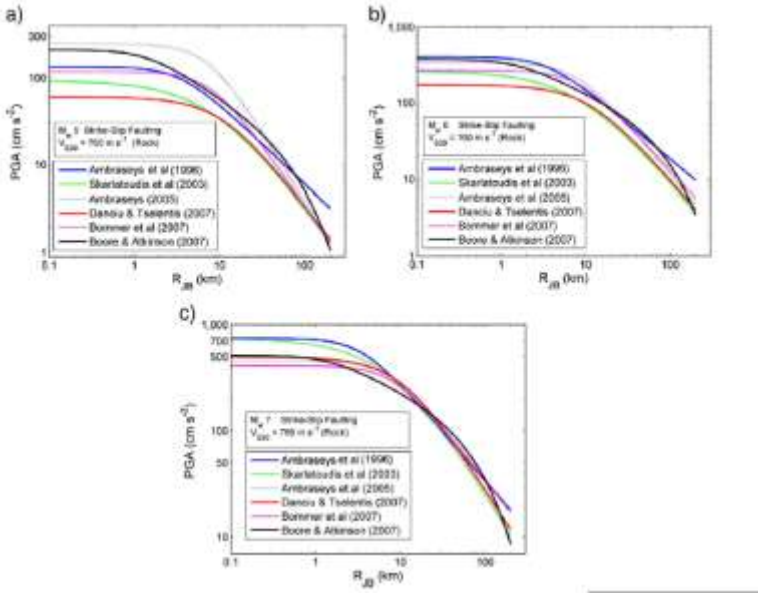
- Η σεισμολογία προσφέρει την καταγραφή της σεισμικότητας (σεισμικός κατάλογος)
- Καθορίζει έτσι τα όρια των σεισμικών πηγών καθώς και ρυθμούς σεισμικότητας
- Προσφέρει πληροφορίες για τα μέγιστα μεγέθη καθώς και για τα μοντέλα επανάληψης σεισμών

Αβεβαιότητες



Σχέσεις Εξασθένησης (GMPE)

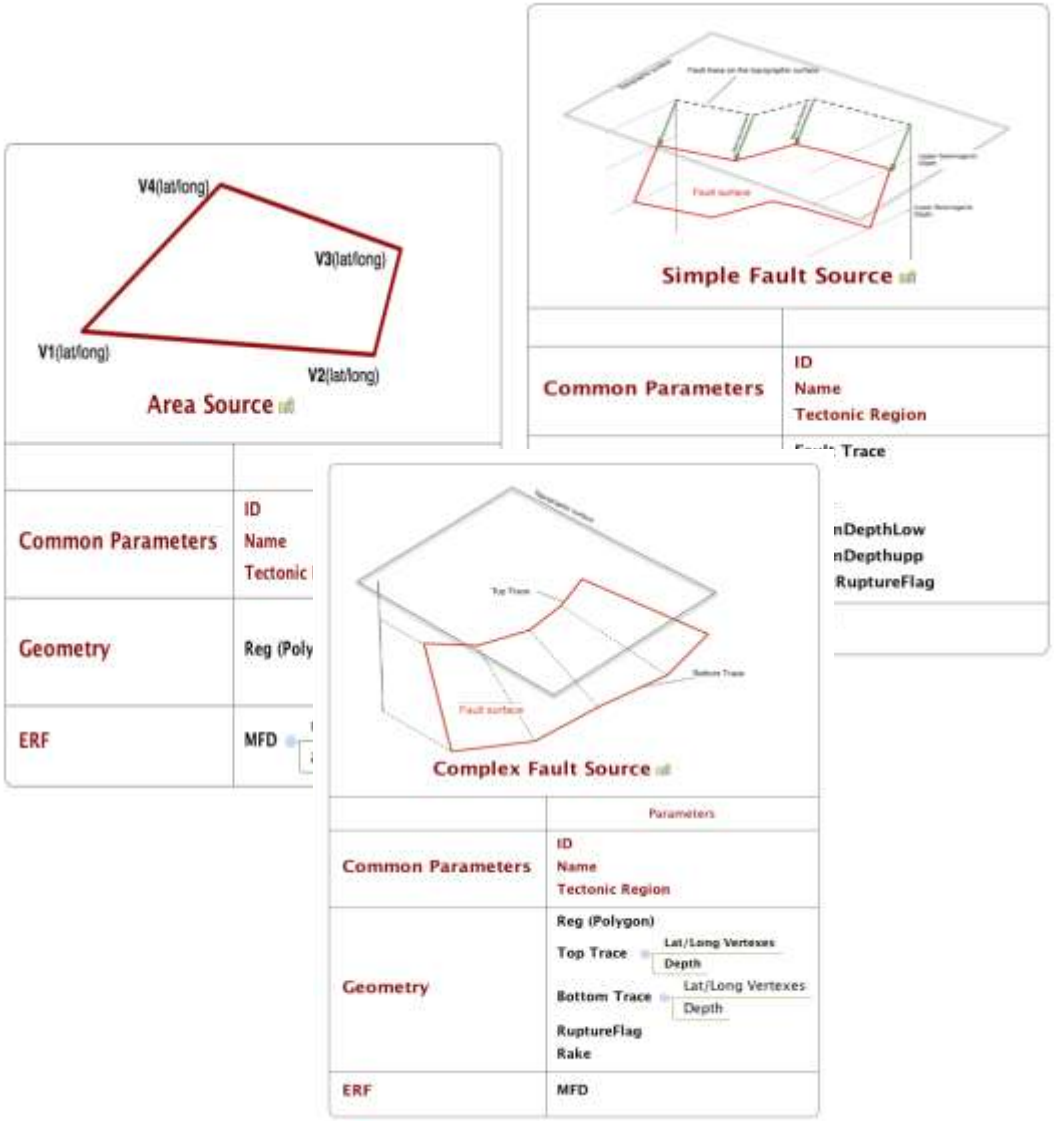




- Η επίδραση της σεισμικής πηγής στη διαδικασία υπολογισμού της σεισμικής επικινδυνότητας εμφανίζεται και στο στάδιο των σχέσεων εξασθένησης

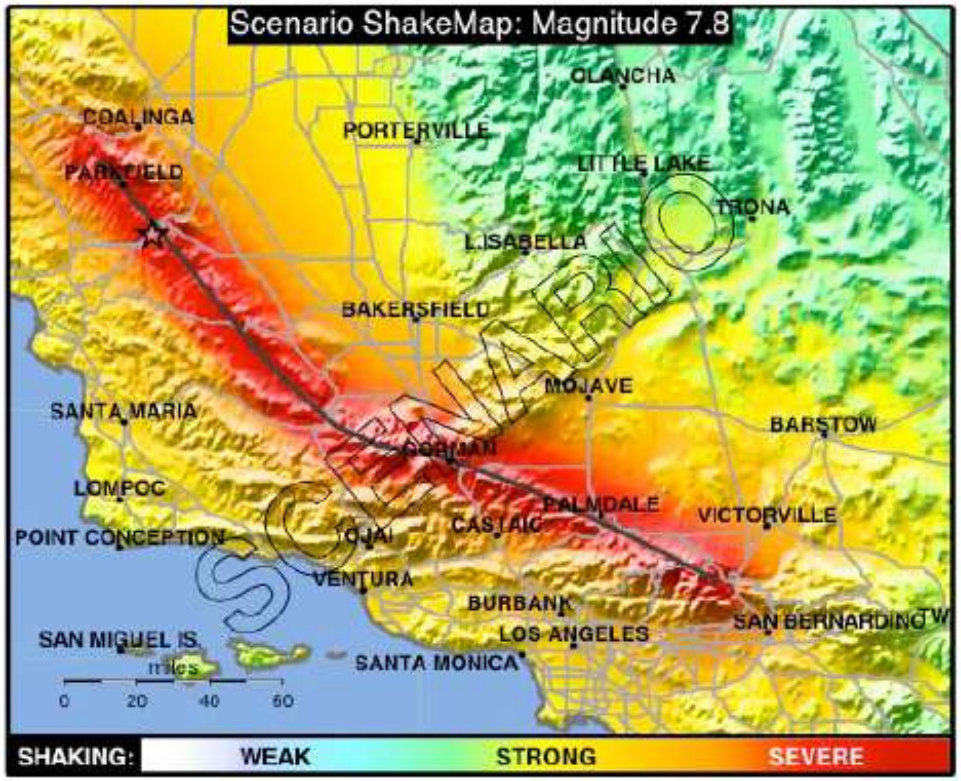
Weatherill and Burton, 2010

Πρότυπα ορισμού σεισμικών πηγών



- **Area source:**
- ✓ Polygonal region with uniform seismicity parameters
- **Grid source:**
- ✓ Set of grid points with spatially variable seismicity parameters
- **Shallow Crust Fault source:**
- ✓ Tree-dimensional (3D) rectangular surface with finite floating ruptures
- **Subduction Fault source:**
- ✓ Tree-dimensional (3D) arbitrarily shaped surface with finite floating ruptures

Αιτιοκρατική προσέγγιση – Σεισμικά σενάρια - Shakemaps



Συμπεράσματα

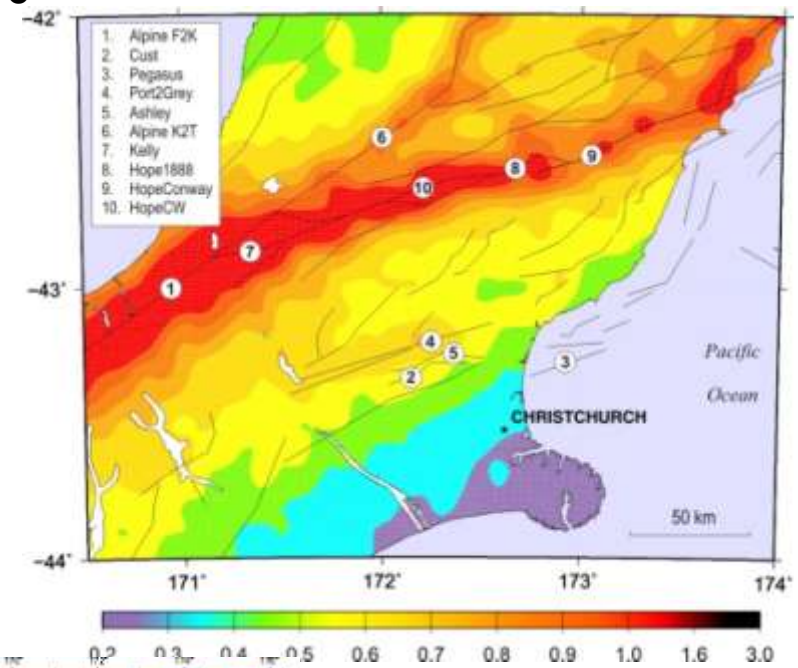
- Ο υπολογισμός της σεισμικής επικινδυνότητας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά της σεισμικής πηγής
- Για τον καθορισμό των χαρακτηριστικών αυτών η συνεισφορά επιστημών όπως γεωλογία, σεισμολογία, γεωφυσική, γεωδαισία είναι απαραίτητη
- Μια σεισμική πηγή καθορίζεται από τη γεωμετρία της, το ρυθμό επανάληψης σεισμών, την χωρική κατανομή τους και από το μέγιστο σεισμικό μέγεθος

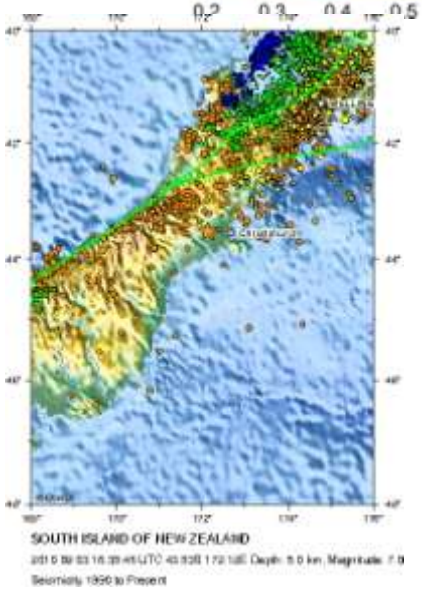
Συμπεράσματα

- Το μέγιστο μέγεθος όπως και το μοντέλο επανάληψης των σεισμών καθορίζουν τη σεισμική επικινδυνότητα σε μεγάλο βαθμό και πρέπει η επιλογή τους να βασίζεται σε γεωλογικά/σεισμολογικά δεδομένα καθώς και να γίνεται ανάλυση της αβεβαιότητας που τα συνοδεύει

- Η ακριβής περιγραφή της σεισμικής πηγής μπορεί να βοηθήσει στην κατασκευή λεπτομερών σεισμικών σεναρίων και υπάρχουν σήμερα οι τεχνολογικές δυνατότητες για την πραγματοποίηση αυτών των αναλύσεων

Νέα Ζηλανδία M=7.0, 3 Σεπτεμβρίου 2010





Σας ευχαριστώ για την προσοχή σας.