

Επαγόμενη σεισμικότητα

Μάθημα 2ο

Συνέχεια θεωρίας και παρουσίαση περιπτώσεων επαγόμενης σεισμικότητας από την πλήρωση και την λειτουργία δύο ταμιευτήρων στον Ελληνικό χώρο.

Κυριότεροι παράμετροι για την πρόκληση επαγόμενης σεισμικότητας

- Συσσώρευση αρχικής τάσης και διακύμανση της στάθμης του ταμιευτήρα
- Μεταβολή της πορικής πίεσης

$$\Delta P = \Delta P_i + \Delta P_{diff}$$

ΔP_i = μεταβολή της πορικής πίεσης, πριν τη διάχυση, λόγω άμεσης επίδρασης.

ΔP_{diff} = μεταβολή της πορικής πίεσης λόγω διάχυσης

- Αυξομείωση της στάθμης \longrightarrow μεταβολή της πίεσης
- Σταδιακή διήθηση της πορικής πίεσης (μήνες – έτη)
- Εποχική αύξηση \longrightarrow διακύμανση της πορικής πίεσης

$$\alpha_s = L^2 / t \quad (\text{σεισμική υδραυλική διηθητικότητα})$$

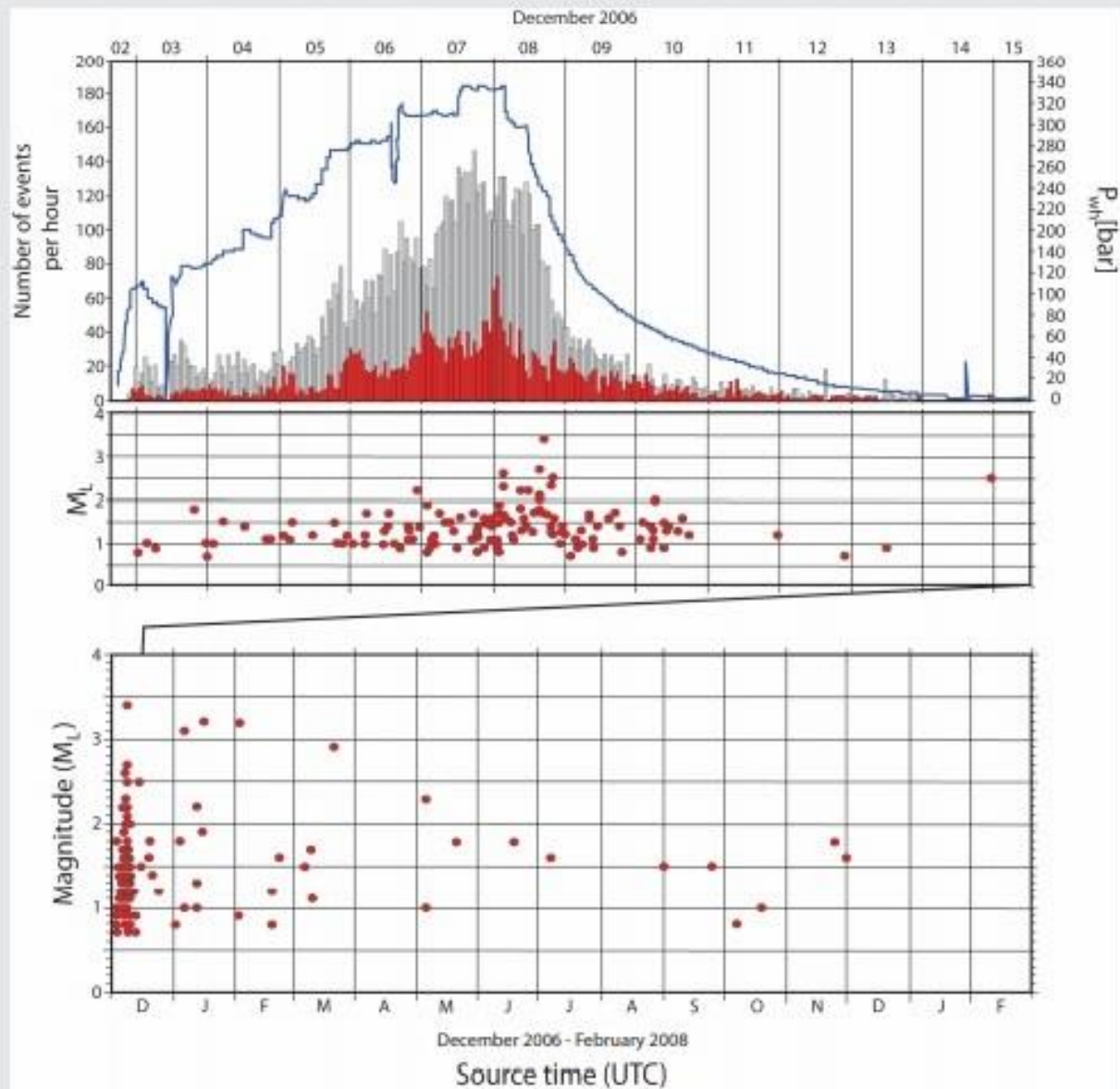
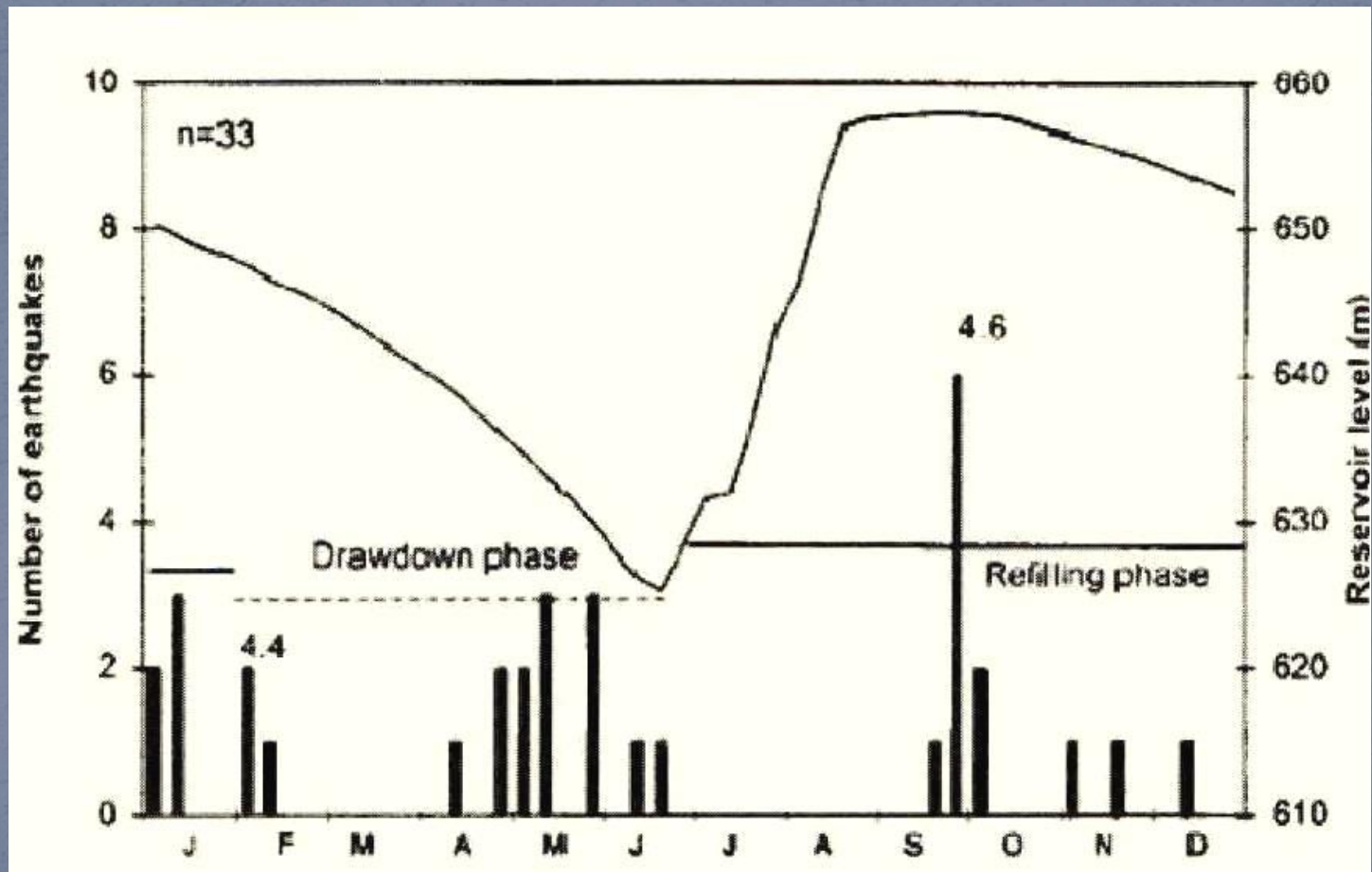


Figure 2 Seismic events and wellhead pressure at Basel. SOURCE: Kraft et al. (2009).

Διάγραμμα παρατεταμένης σεισμικότητας και
διακύμανση της στάθμης κατά την διάρκεια του 1983
(λίμνη **Kouyna**)



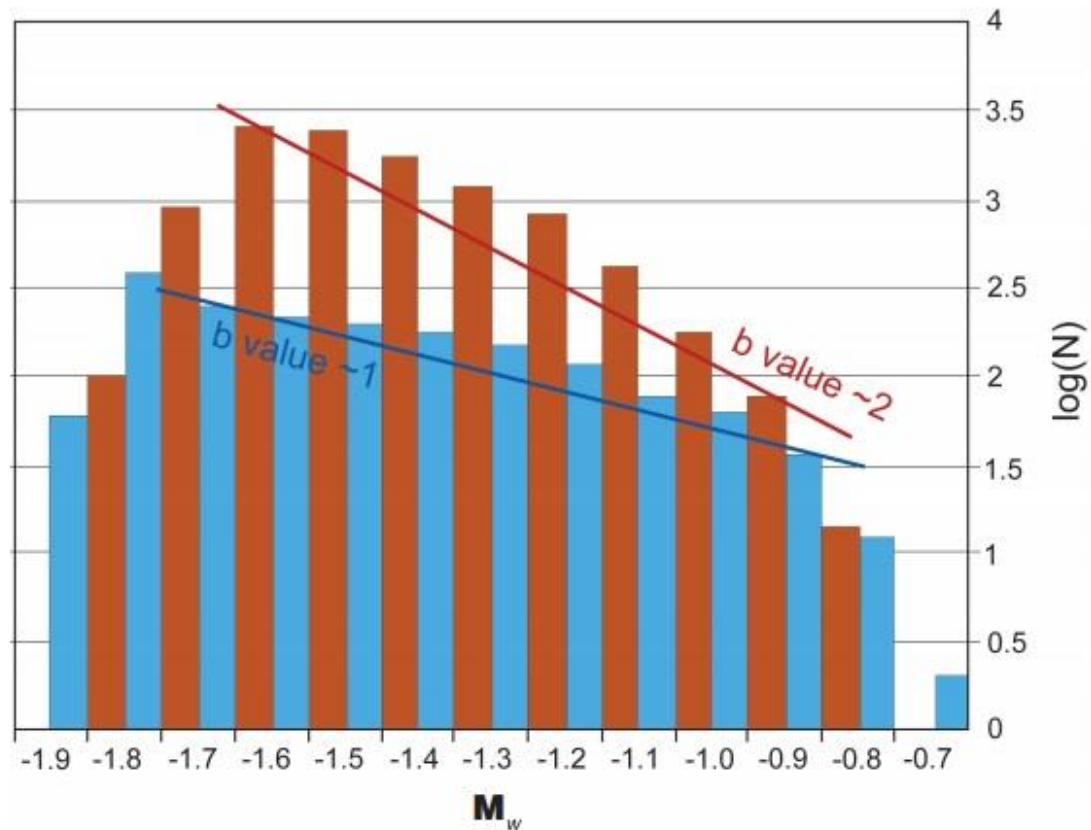


FIGURE E.2 Graph shows b values for two different microearthquake populations during a hydraulic fracture treatment. The b values vary from about 1 for reactivated tectonic microseismic events and 2 for microseismicity associated with the hydraulic fracture injection. The hydraulic fracture microseismic magnitudes are typically very small (less than M_0), hence the lack of larger microseismic events on this b value example. SOURCE: From Wessels et al. (2011).

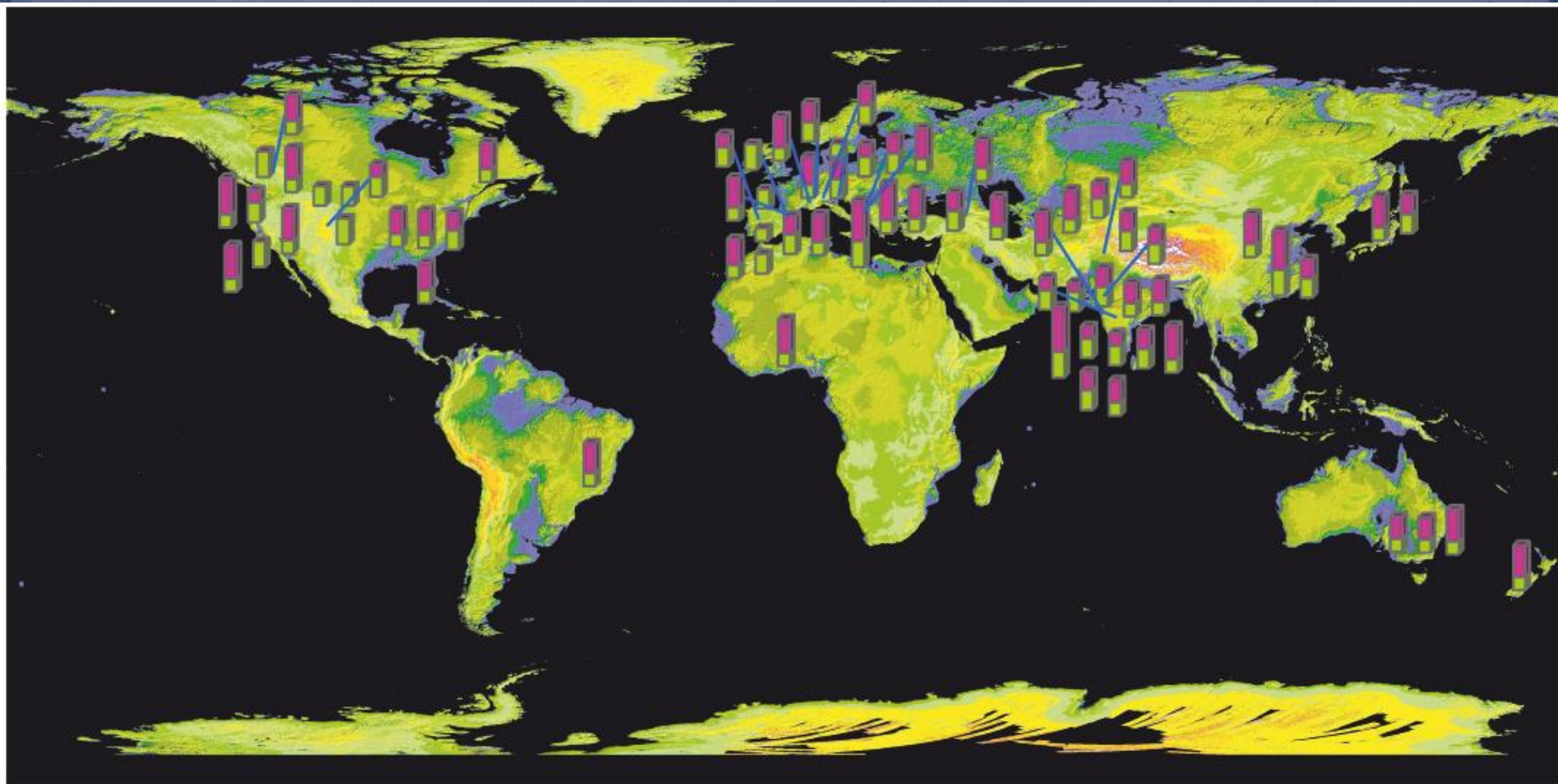
Απόψεις και βασικά χαρακτηριστικά σύμφωνα με τα μέχρι σήμερα επιστημονικά δεδομένα

1. Τα επίκεντρα συνήθως βρίσκονται στην ευρύτερη περιοχή του ταμιευτήρα (Judd, 1974)
2. Επιφανειακοί σεισμοί βάθους έως **15Km** (Skirp, 1981)
3. Τιμή **b** (**1.3-1.5**) φορές μεγαλύτερη από τους φυσικούς (Gupta, 1976)
4. Η σεισμική ακολουθία συνήθως ανήκει στον **τύπο II** (Mogi, 1966)
5. Οι **22** από τις 57 διαπιστωμένες περιπτώσεις συνδέονται με βαρυτικά ρήγματα ολίσθησης (Castle et al, 1980)
6. Το μέγεθος του επαγόμενου σεισμού καθορίζεται από το γεωλογικό καθεστώς

7. Τα περισσότερα παραδείγματα έλαβαν χώρα σε περιοχές με χαμηλή τεκτονική φόρτιση και καθεστώς κανονικών ρηγμάτων (Simpson, 1988)
8. Σε ορισμένες περιπτώσεις παρατηρείται ένας μεγαλύτερος αριθμός σεισμών μετά την πλήρωση ιδιαίτερα κατά την πρώτη δεκαετία (Anderson, 1993)
9. Οι επαγόμενοι σεισμοί διεγείρονται μερικές φορές από ένα μικρό κλάσμα της τάξεως του **1 bar**.

Ταξινόμηση παγκόσμιων περιπτώσεων σε τρία επίπεδα (I, II, III) από Knoll (1992)

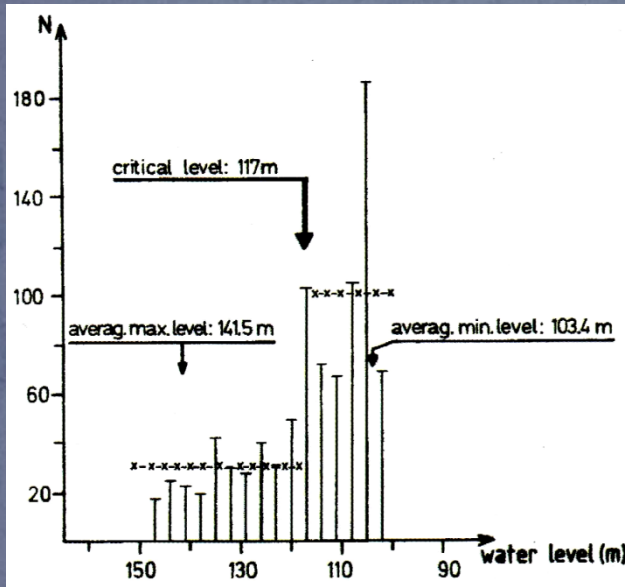
Αριθμός	Σεισμικότητα	Εύρος (M_{max})	Πλήθος Ταμιευτήρων v	Επίπεδο RIS (Level RIS)
1	Χαμηλή	≤ 3.0	35	III
2	Ήπια	3.1 - 3.9	30	II
3	Μέτρια	4.0 - 5.9	34	II
4	Σφοδρή	≥ 6.0	4	I



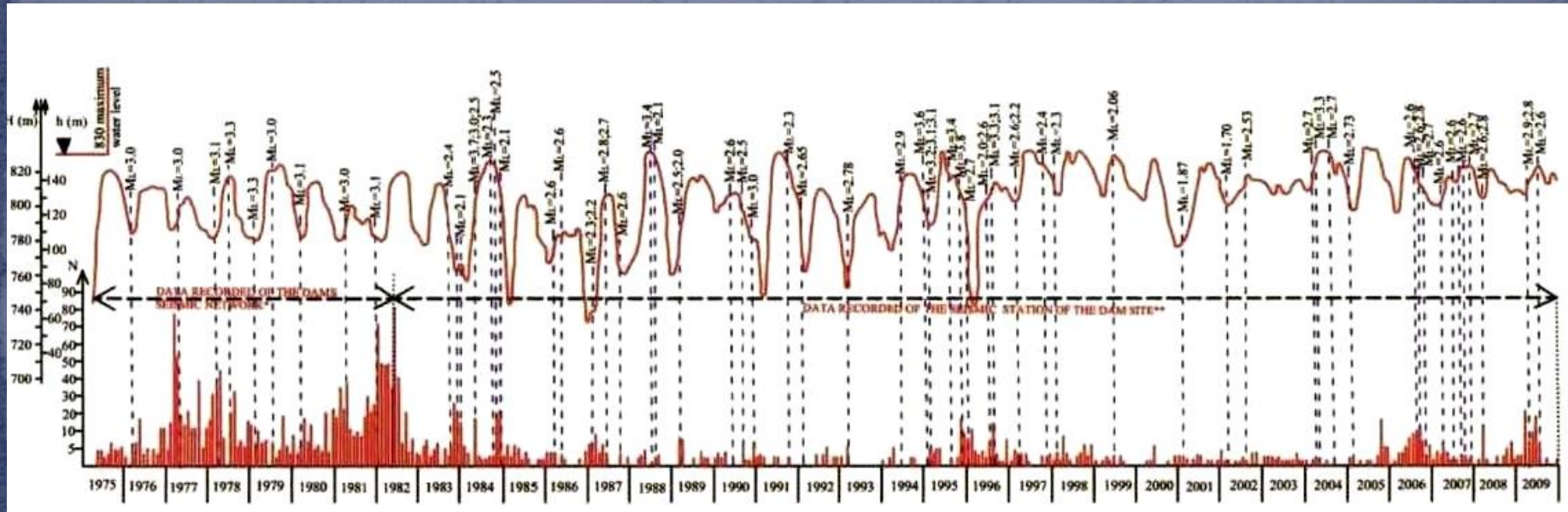
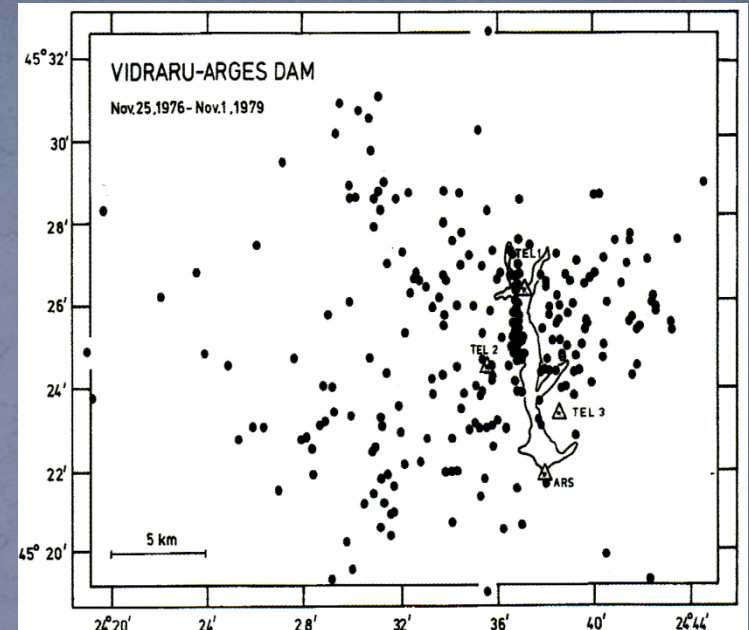
Εικόνα 4.2 : Χάρτης παγκόσμιας κατανομής σύμφωνα με ταξινόμηση κατά Knoll (1992) και το μέγιστο μέγεθος του επαγόμενου σεισμού.







- Mmax
- Level I, II, III

Vidraru-Agres (1976-1979), Moldoveanu et al, 2010



$M_{max} = 3.7$
 Critical level
 120-110m
 (8-25Km)



Ταμιευτήρας	Κατηγορία I	Κατηγορία II	Κατηγορία III
ΣΦΗΚΙΑ			103
ΠΗΓΕΣ ΑΩΟΥ			260
ΣΤΡΑΤΟΣ		810 	
ΤΑΥΡΩΠΟΣ			400
ΠΟΥΡΝΑΡΙ I		865	
ΠΟΥΡΝΑΡΙ II			4.6
ΚΡΕΜΑΣΤΑ 	4.500		
ΚΑΣΤΡΑΚΙ 		950	
ΠΟΛΥΦΥΤΟ	2.244		
ΑΣΩΜΑΤΑ			56
ΜΟΡΝΟΣ		763 	
ΛΟΥΡΟΣ			1.075
ΛΑΔΩΝΑΣ			57.6
ΠΛΑΤΑΝΟΒΡΥΣΗ			93
ΘΗΣΑΥΡΟΣ		705 	
ΜΕΣΟΧΩΡΑ			228
ΣΜΟΚΟΒΟ			20
ΜΑΡΑΘΩΝΑΣ 			40.34
ΕΥΗΝΟΣ			137.63
ΛΕΥΚΟΓΕΙΑ ΔΡΑΜΑΣ			11.95
ΠΗΝΕΙΟΣ ΗΛΕΙΑΣ			420
ΜΠΡΑΜΙΑΝΟΣ ΙΕΡΑΠΕΤΡΑΣ			15

Περιπτώσεις Ελληνικού χώρου

- Πολυφύτου
- Σφηκιάς
- Ασωμάτων

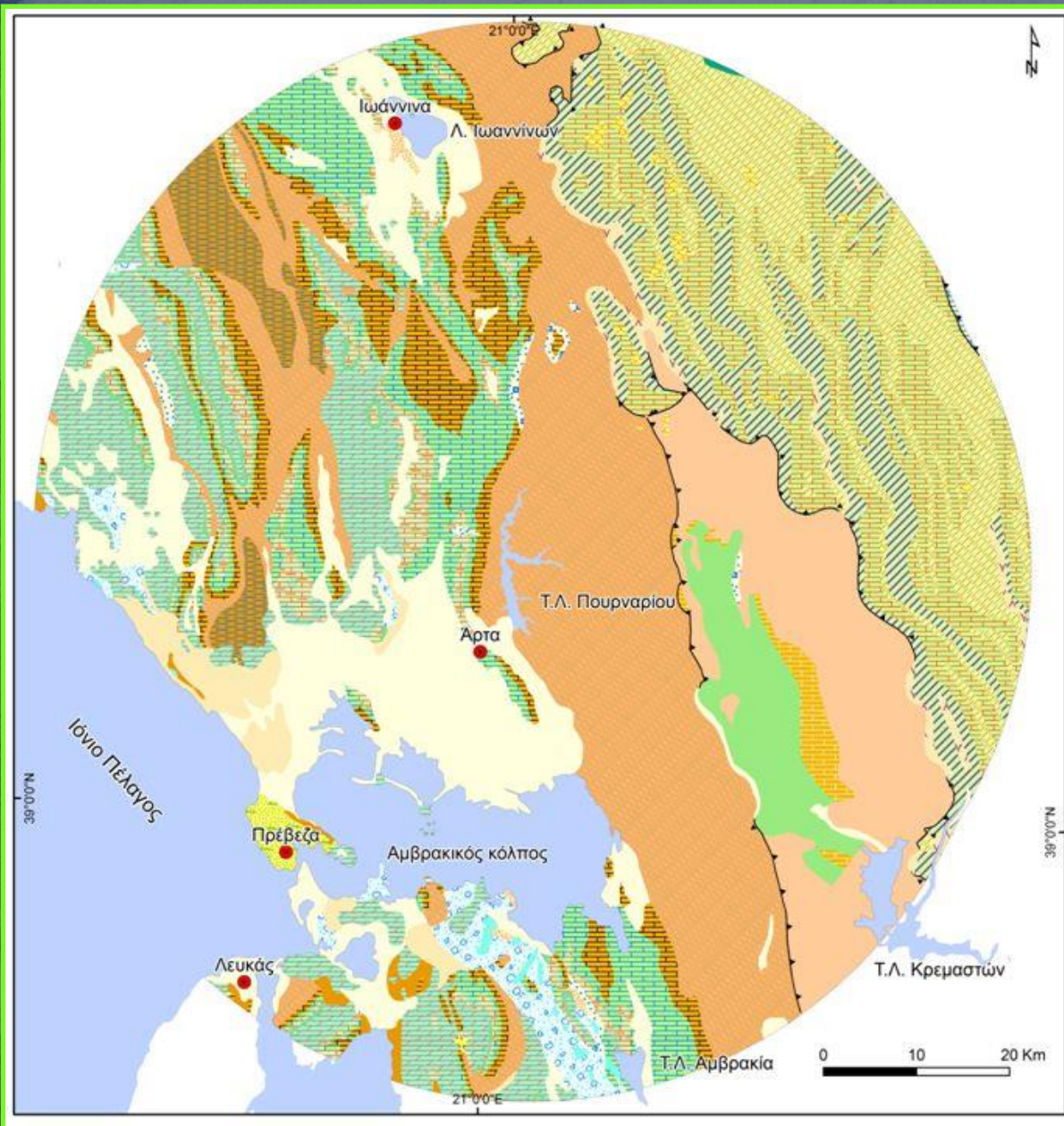
Περιοχή Αλιάκμονα

- Πουρναρίου Ι,ΙΙ

Περιοχή Άραχθου

Μελέτη επαγόμενης σεισμικότητας λόγω της πλήρωσης του φράγματος Πουρναρίου

- Γεωλογία της περιοχής
- Τεκτονική της περιοχής
- Σεισμικότητα πριν και μετά από την πλήρωση
- Διαγράμματα συσχέτισης στάθμης και σεισμικότητας
- Υπολογισμός τιμής b της σχέσης Gutenberg-Richter
- Υπολογισμός τιμών M_1/M_0
- Μηχανισμοί γένεσης των κύριων σεισμών
- Σεισμικές τομές
- Υπολογισμός τάσεων Coulomb για τον σεισμό της 10^{ης} Μαρτίου 1981



ΙΟΝΙΟΣ ΖΩΝΗ

ΑΝΩΤΕΡΟ ΗΩΚΑΙΝΟ

Φλύσχης

ΠΑΛΑΙΟΚΑΙΝΟ - ΚΑΤΩΤΕΡΟ ΗΩΚΑΙΝΟ

Ασβεστόλιθοι

ΣΕΝΩΝΙΟ

Ασβεστόλιθοι

ΙΟΥΡΑΣΙΚΟ - ΣΕΝΩΝΙΟ

Ασβεστόλιθοι με silice και αργιλικό σχιστόλιθοι

ΜΕΣΟ ΙΟΥΡΑΣΙΚΟ

Αμμοιτικό Rosso, ασβεστόλιθοι, ή πυριτόλιθοι με Posidonia

ΑΝΩΤΕΡΟ ΤΡΙΑΔΙΚΟ - ΚΑΤΩΤΕΡΟ ΙΟΥΡΑΣΙΚΟ

Ασβεστόλιθοι του Παντοκράτορα

ΚΑΤΩΤΕΡΟ ΤΡΙΑΔΙΚΟ

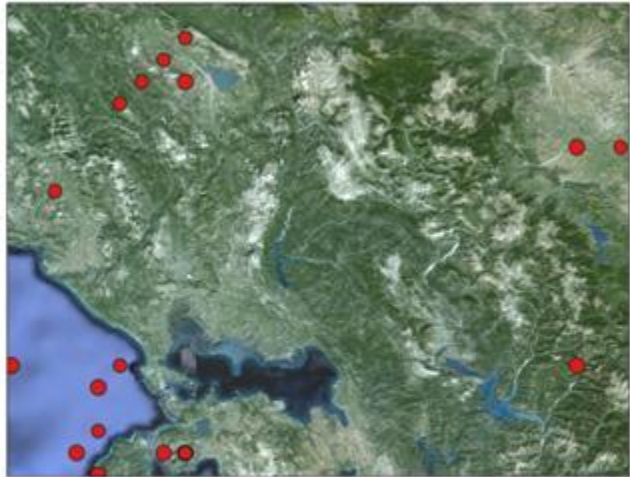
Ασβεστολιθικά λατυποπαγή

Εβαπορίτες

Ιστορική σεισμικότητα έως
το 1900



Κατανομή σεισμικότητας έως το 1900 μ.χ.



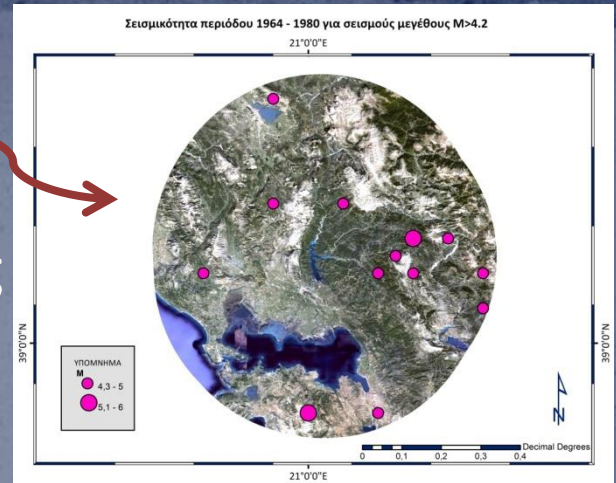
ΥΠΟΜΝΗΜΑ
Κατανομή σεισμικότητας
Μέγεθος
● 4,0 <= M < 5,4
● 5,5 <= M < 7

0 0,1 0,2 0,3 0,4
Decimal Degrees

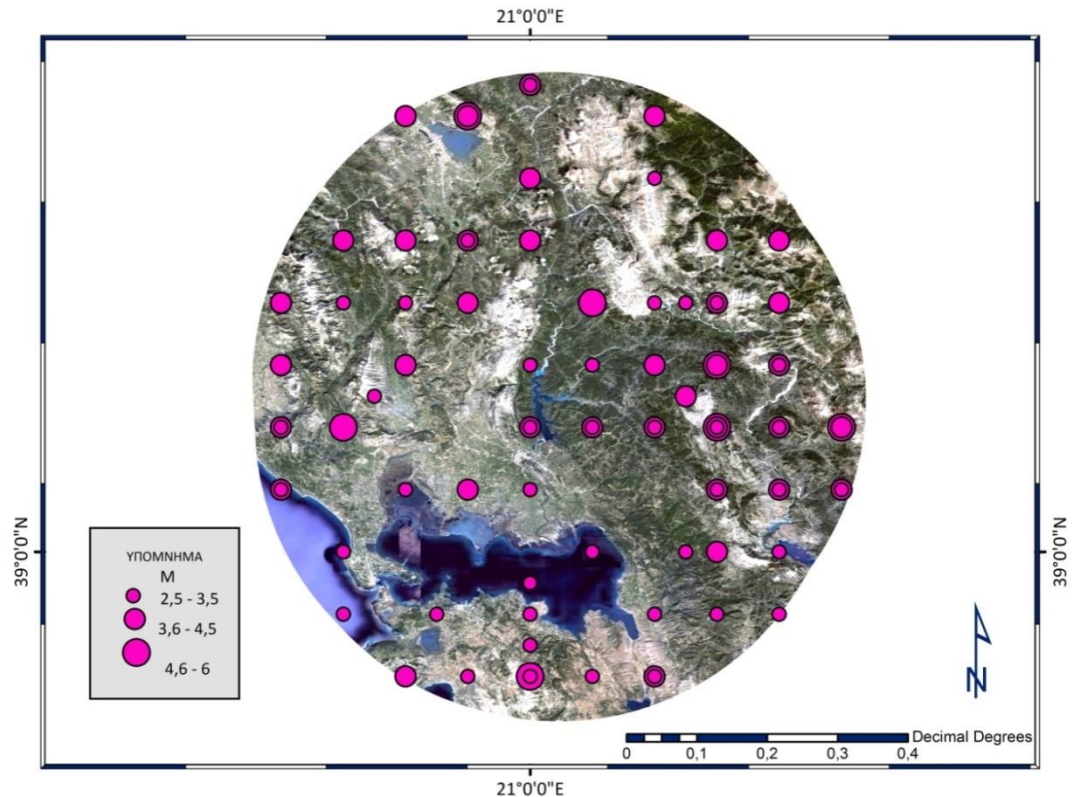
1964 – 1980

M>4.2

Σεισμός Αμφιλοχίας
στις 13/9/1921
M=5.6.



Σεισμικότητα περιόδου 1964 - 1980

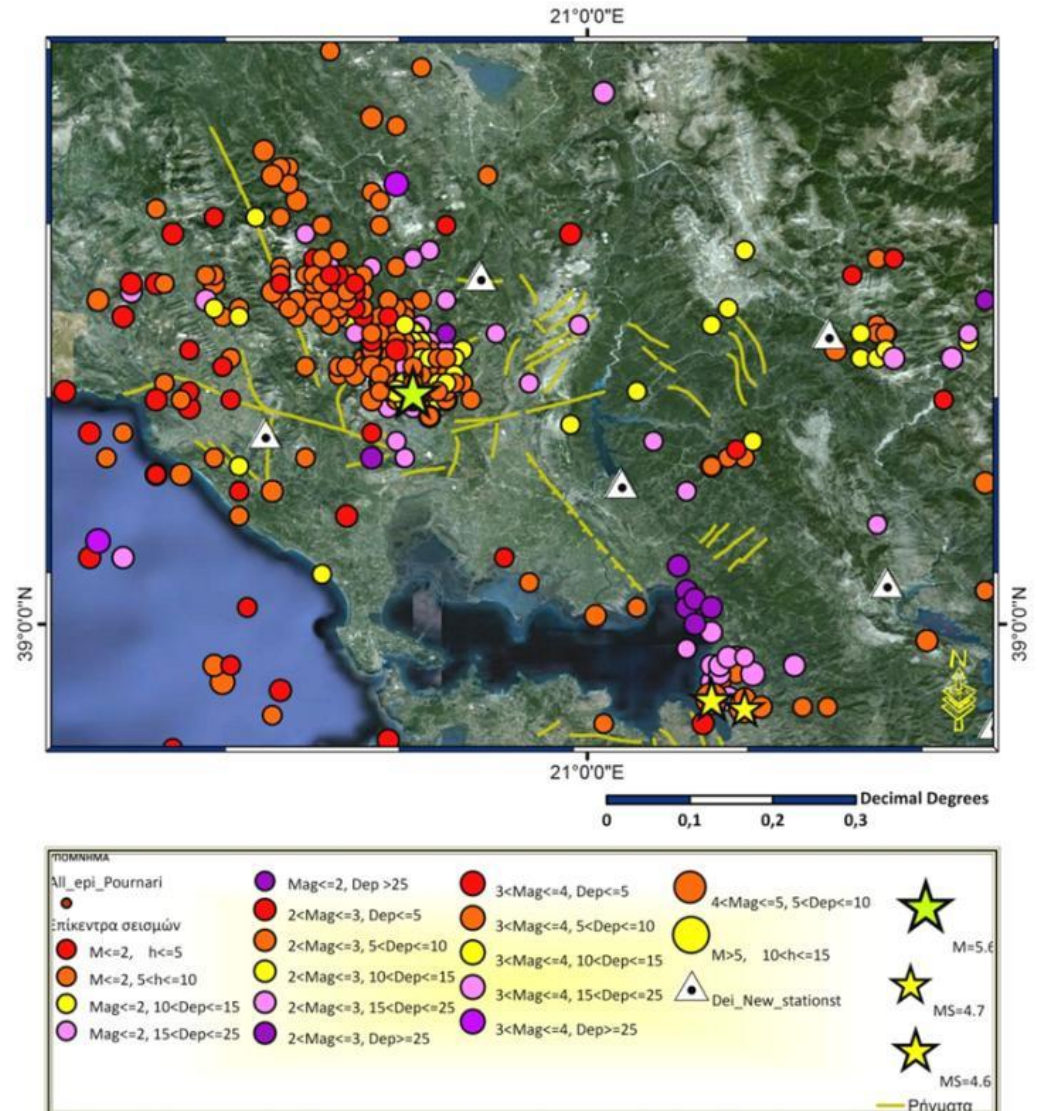




Περίοδος 1/1/1981 – 31/4/1981

- Σεισμική έξαρση δυτικά της λίμνης (κύριος σεισμός $M_L = 5.6$)
- Σεισμική έξαρση στο ανατολικό άκρο του Αμβρακικού κόλπου (κύριος σεισμός $M_L = 4.7$)

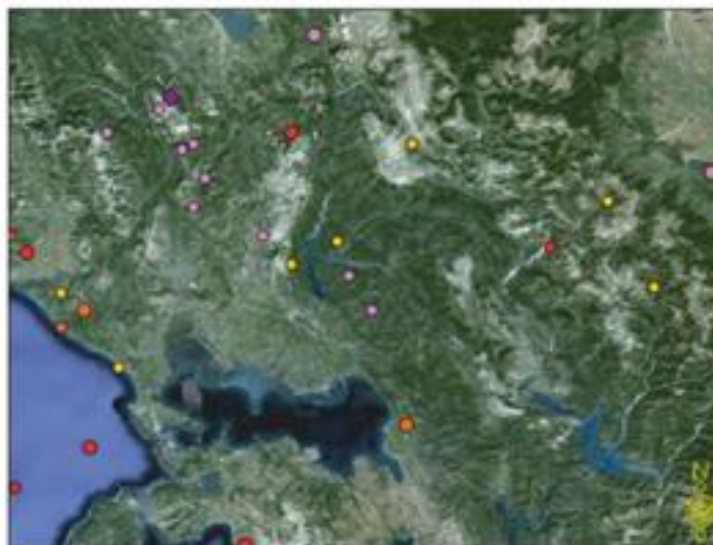
Σεισμικότητα ευρύτερης περιοχής του ταμειυτήρα Πουρναρίου για την χρονική περίοδο Ιανουάριος έως Απρίλιος 1981.



Σεισμικότητα περιόδου Ιανουάριος 1981



Σεισμικότητα περιόδου Φεβρουάριος 1981



Σεισμικότητα περιόδου Μάρτιος 1981



Σεισμικότητα περιόδου Απρίλιος 1981

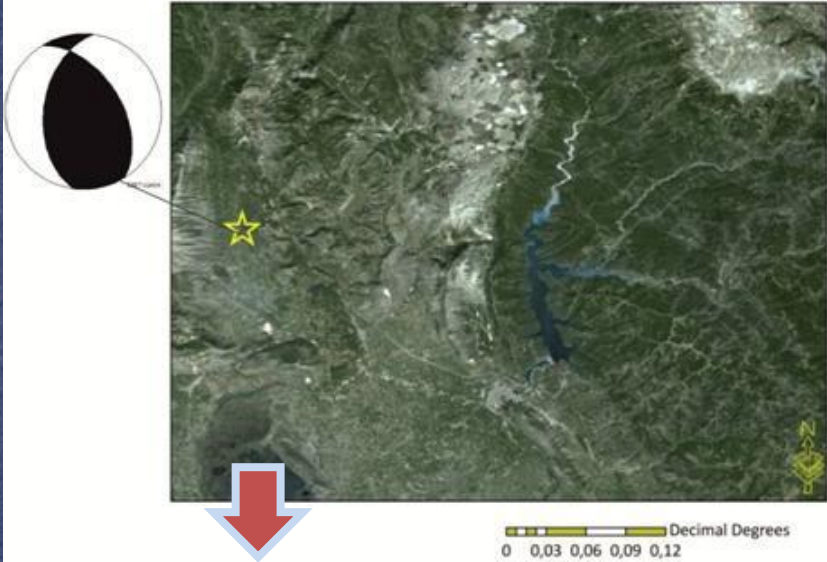


0 0,1 0,2 0,3 0,4 Decimal Degrees

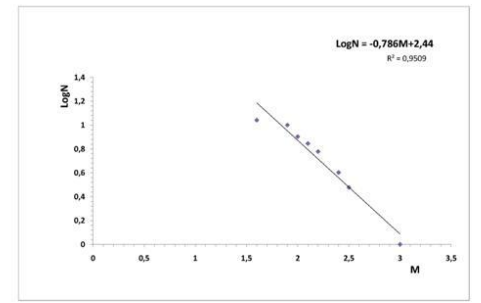
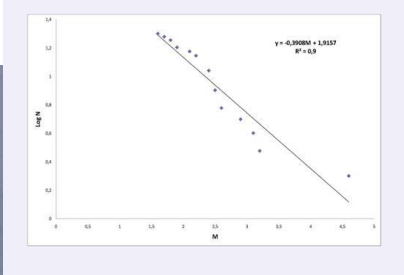
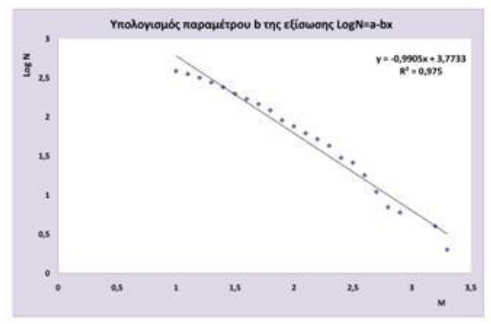
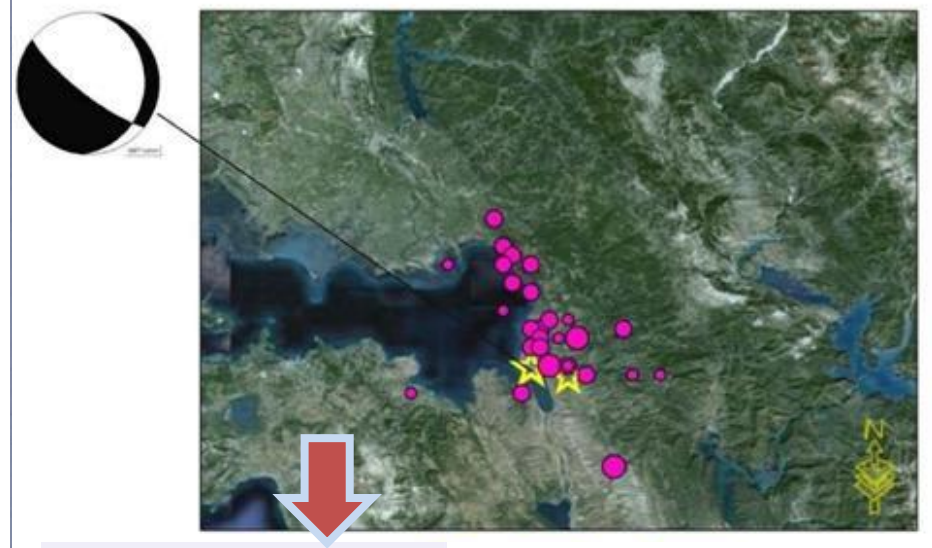
Τιμή $b_{\text{μετά}}=0.99$ μετασεισμικής ακολουθίας σεισμού $M_L=5.6$ (10/3/1981)

Τιμή $b_{\text{προ}}=0.39$ και $b_{\text{μετά}}=0.76$ σεισμικής ακολουθίας σεισμού $M_L=4.7$ (10/4/1981)

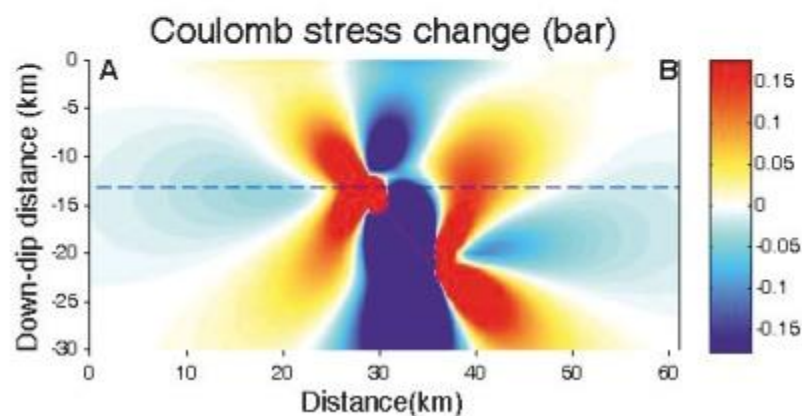
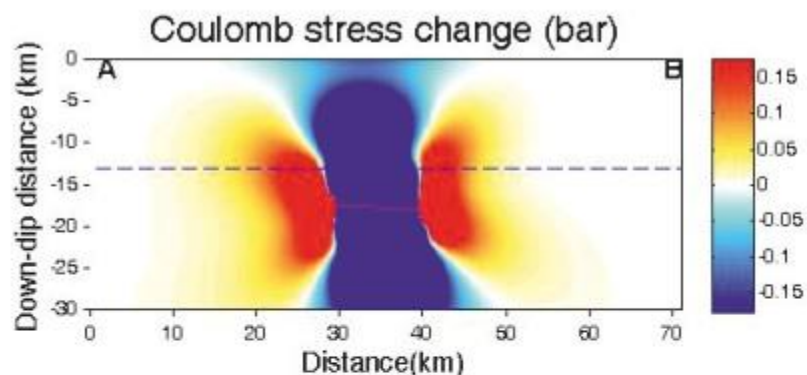
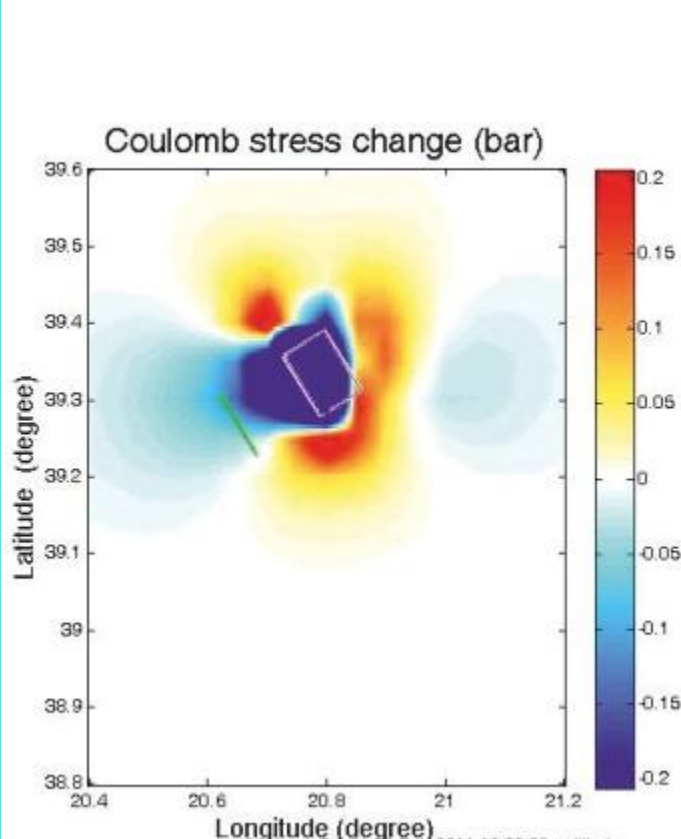
Σεισμός Μεγέθους $M=5,6$ (10-3-1981)



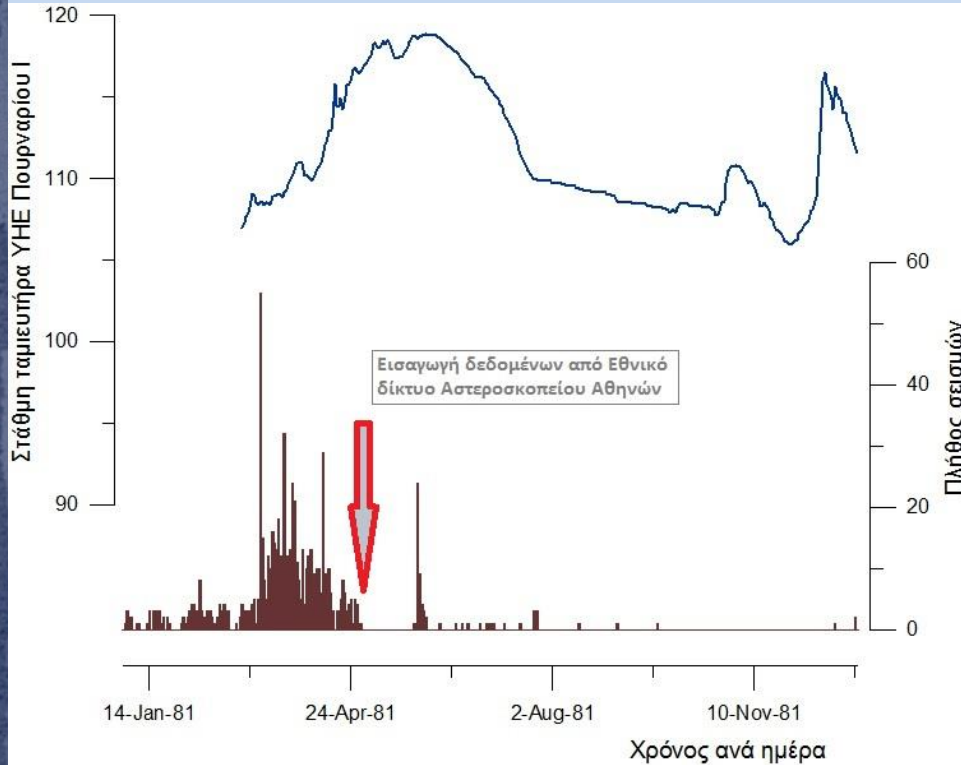
Σεισμική ακολουθία σεισμικής δόνησης μεγέθους $M=4.7$ (10-4-81)



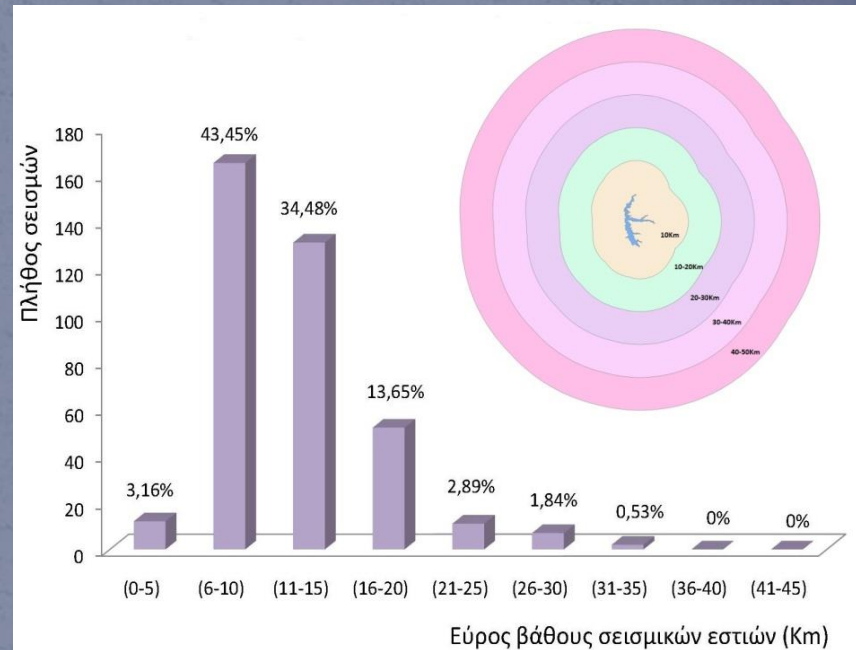
Πιθανή διέγερση του σεισμού $M=4.7$ από τον πρώτο σεισμό $M_L=5.6$. Μέθοδος και υπολογισμός των μεταφερόμενων τάσεων στην ευρύτερη περιοχή (ερμηνεία).



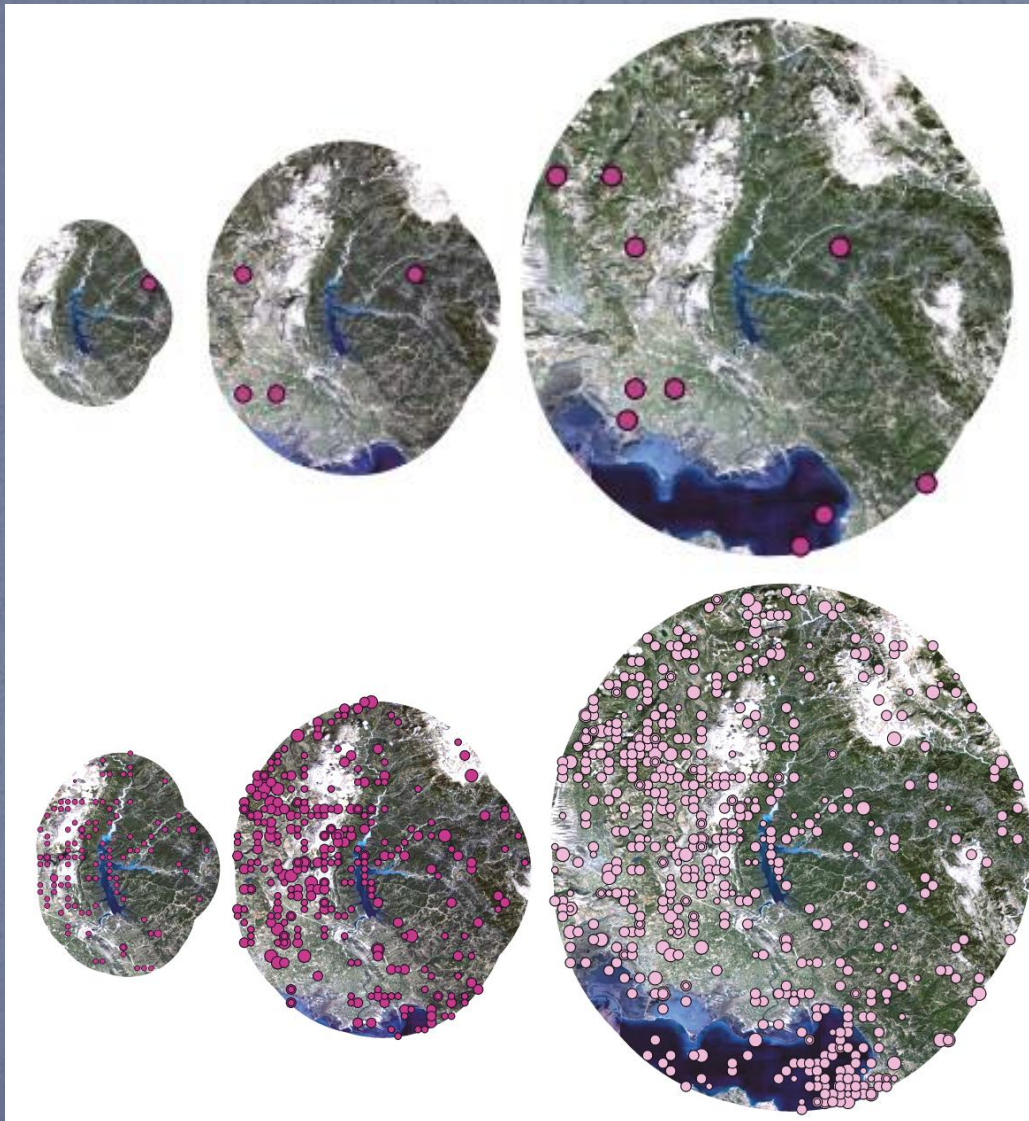
Διάγραμμα συσχέτισης στάθμης του ταμιευτήρα με σεισμικότητα



Ποσοστιαία κατανομή σεισμικότητας ως προς το βάθος (για $d=30\text{Km}$)



Σεισμικότητα περιόδου 1982-2010

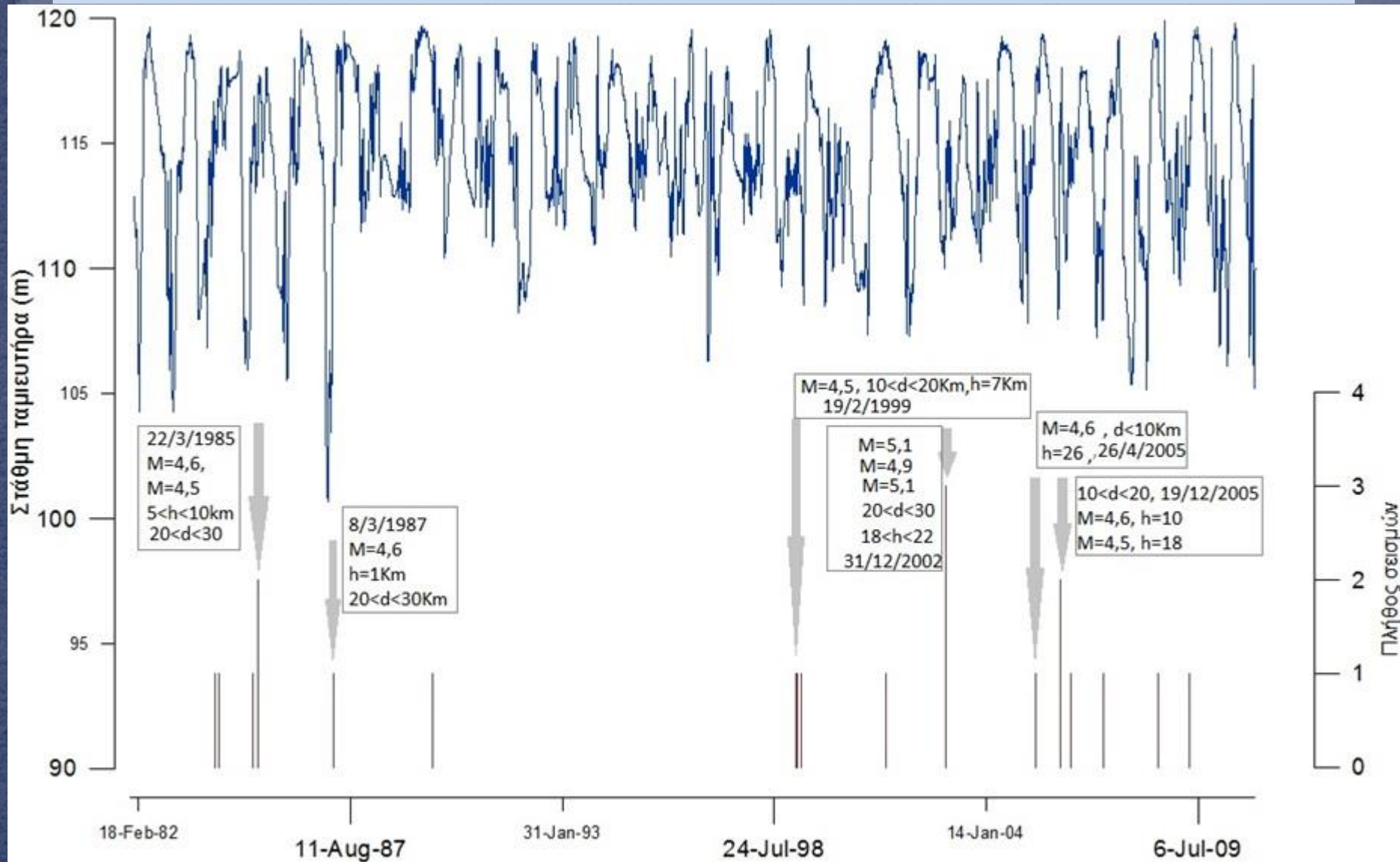


- Χωρική κατανομή επικέντρων για σεισμικά γεγονότα μεγέθους $M > 4.4$

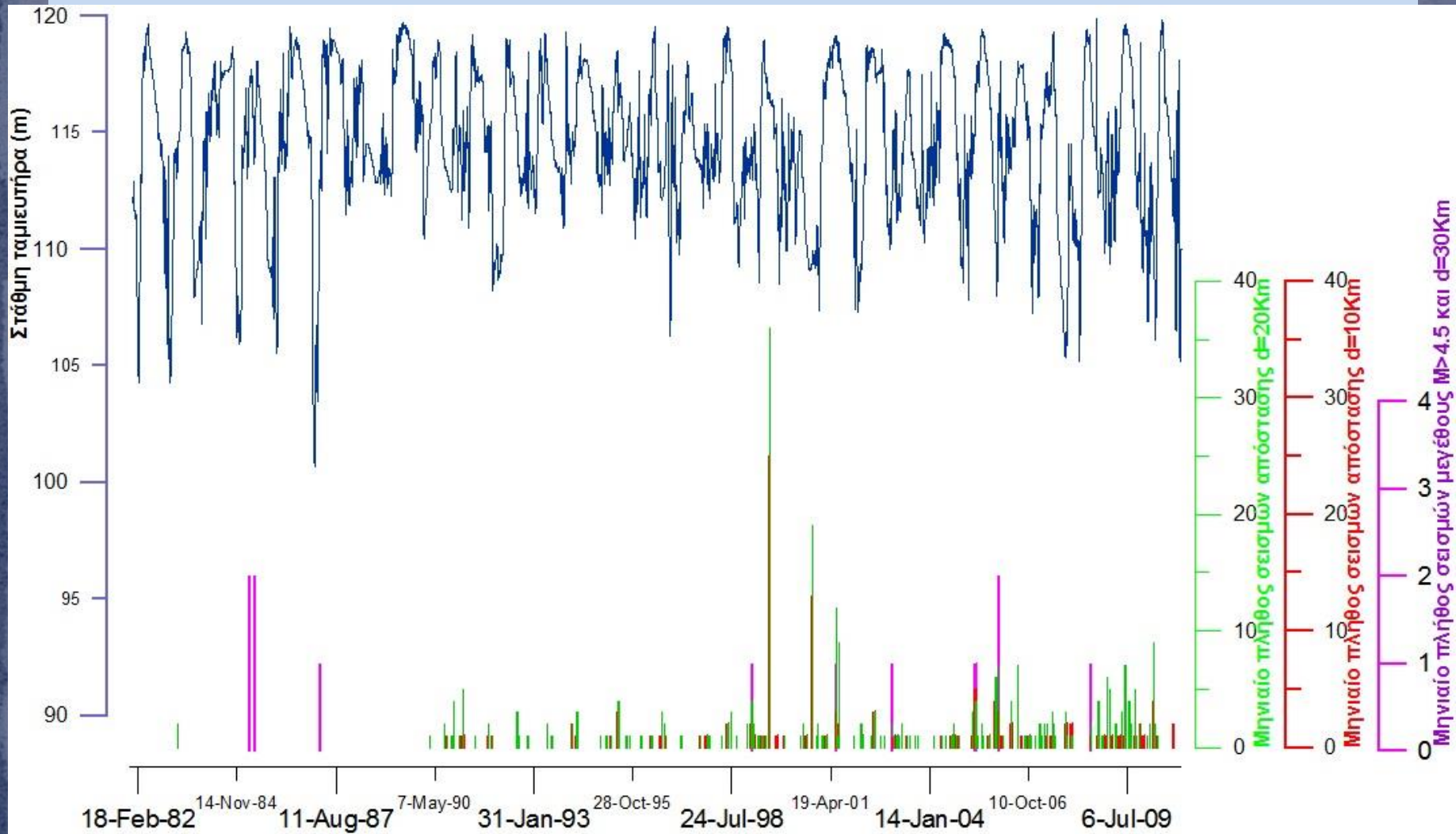


- Χωρική κατανομή σεισμικότητας όλων των σεισμικών γεγονότων.

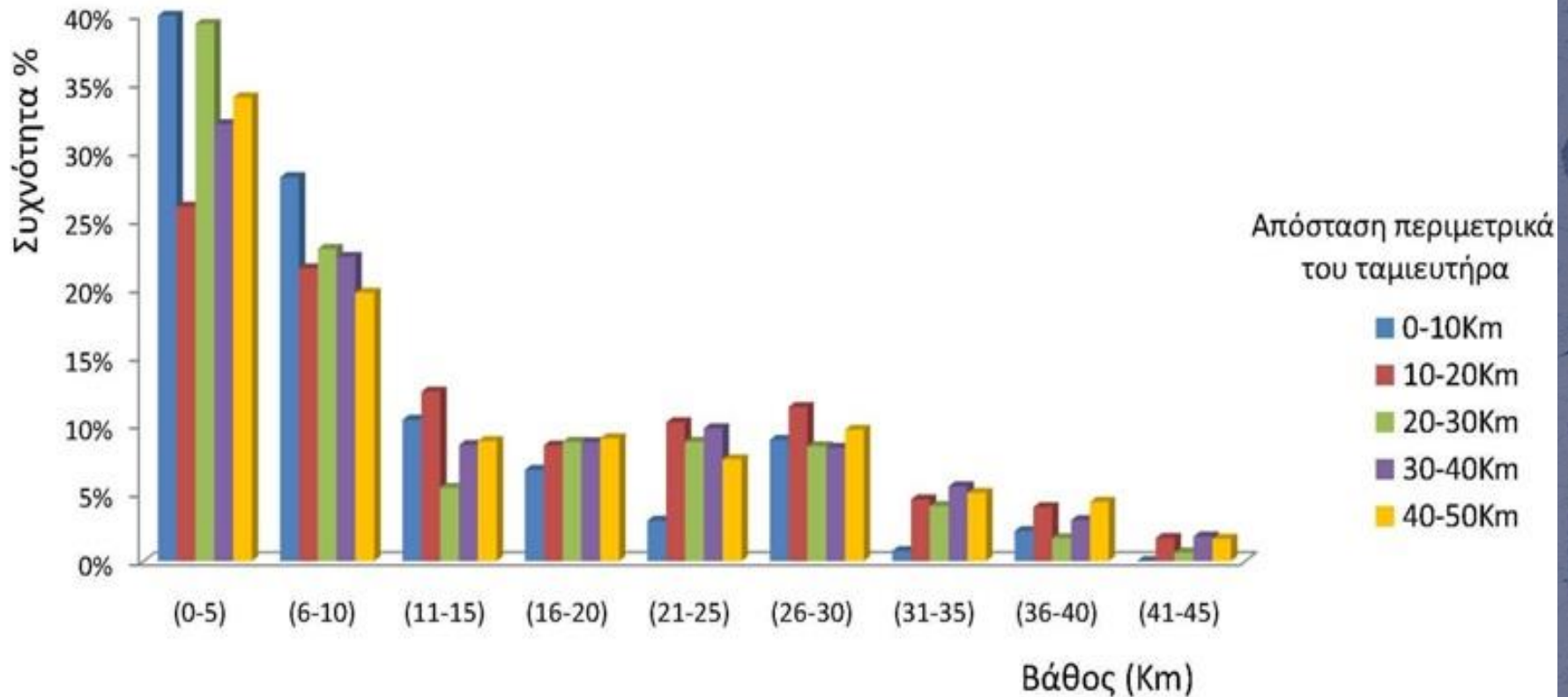
Διάγραμμα συσχέτισης διακύμανσης της στάθμης και σεισμικότητας $M > 4.5$ και $d = 40\text{Km}$. (1982-2010)



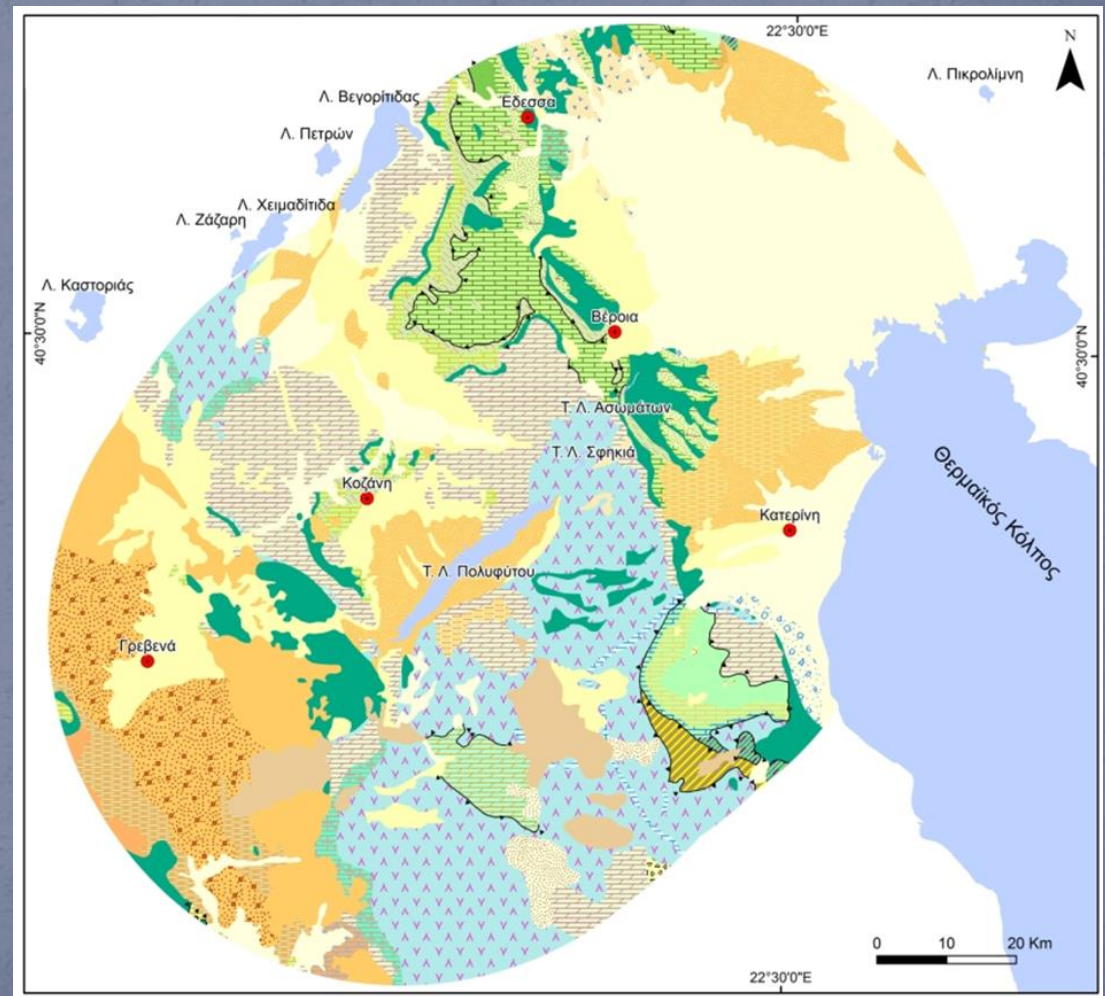
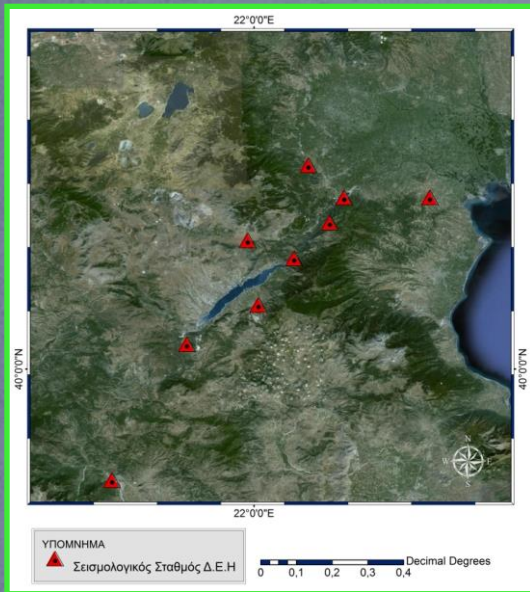
Διάγραμμα συσχέτισης διακύμανσης της στάθμης και σεισμικότητας για αποστάσεις $d=10\text{Km}$, 20Km και 30Km



Διάγραμμα πλήθους σεισμικότητας (%) ως προς το βάθος για διαφορετικά εύρη απόστασης (περίοδος 1982 – 2010).



Περίπτωση επαγόμενης σεισμικότητας ΥΗΕ-Πολυφύτου- Σφηκιάς-Ασωμάτων (Αλιάκμονας)

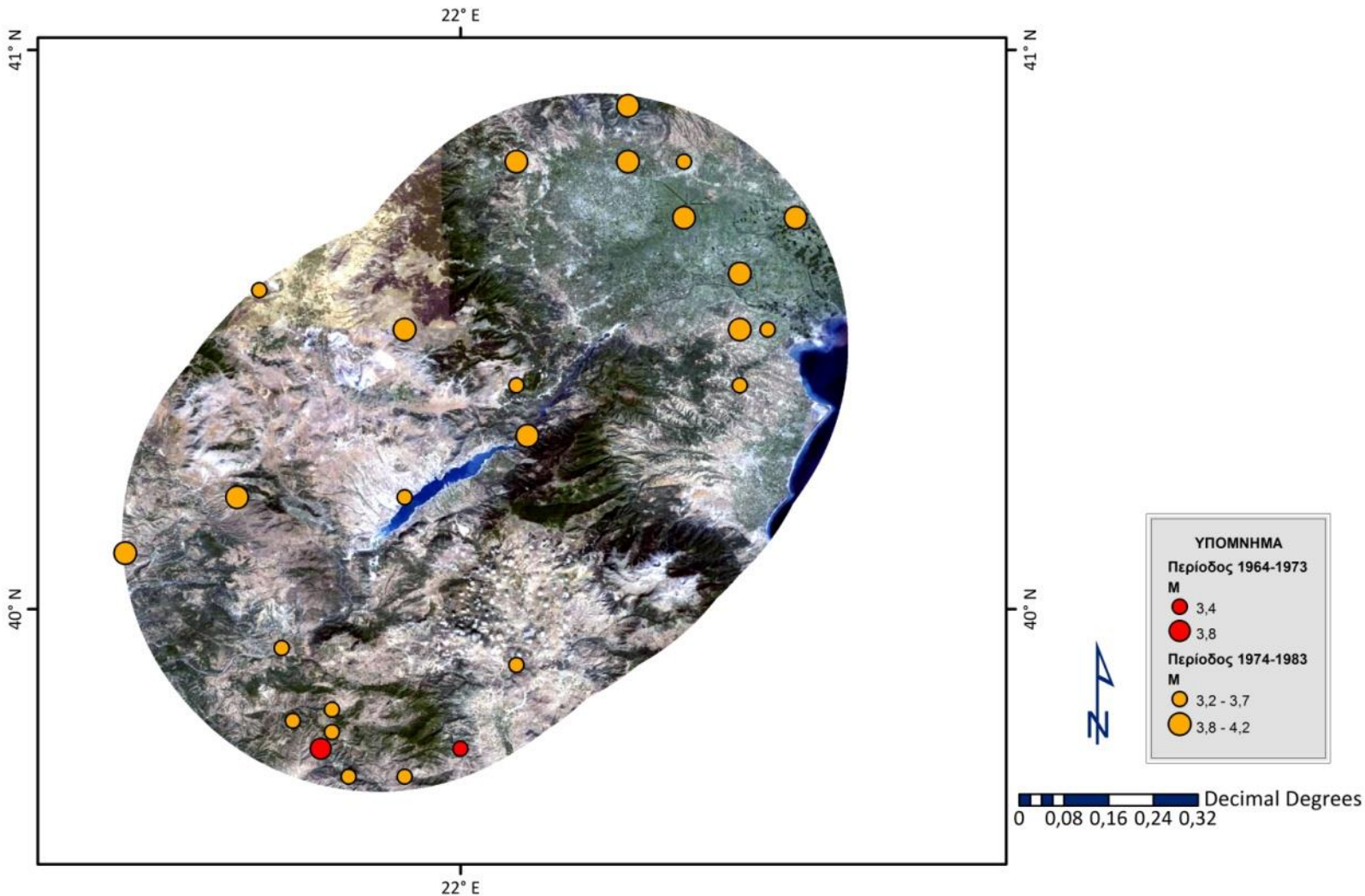


Απαραίτητη η διερεύνηση της Ιστορικής σεισμικότητας

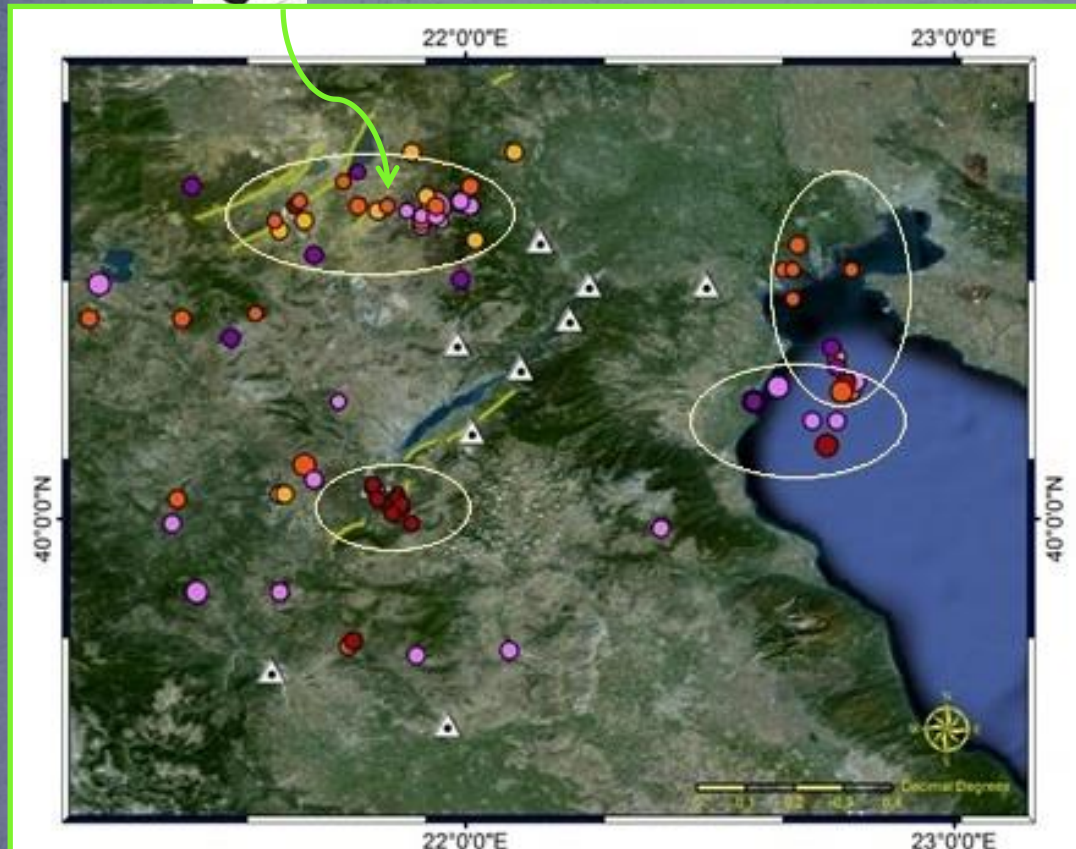
- Αρχές Αυγούστου **904**μ.χ. σεισμός $M=6$ έλαβε χώρα στην ευρύτερη περιοχή της **Βέροιας** (Ambraseys, 1999).
- Στις αρχές του **1200** καταστρεπτικός σεισμός έπληξε την περιοχή της **Βέροιας**
- Τον Οκτώβριο του **1395** έλαβε χώρα σεισμός που έπληξε την περιοχή της **Έδεσσας**.
- Στα έτη **1695**, **1766** και **1852**, έλαβαν χώρα 3 καταστρεπτικοί σεισμοί οι οποίοι προκάλεσαν εκτεταμένες ζημιές στα **Σέρβια** όσο και στα γειτονικά χωριά, (Papanastasiou et. al., 1998).

Σεισμικότητα 1964-1983

Σεισμικότητα απόστασης 50Km περιμετρικά των ταμιευτήρων των ΥΗΕ Πολυφύτου - Σφηκιάς - Ασωμάτων.



Περίοδος 1/4/84 - 30/09/84

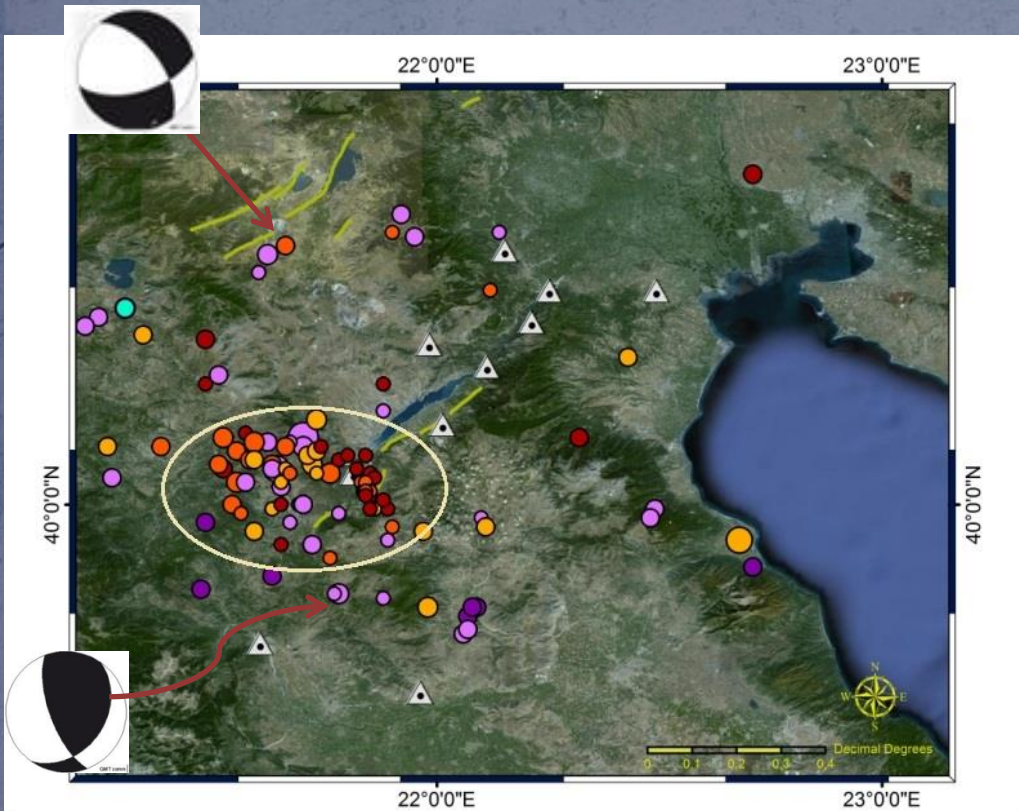


Σεισμός Βεγορίτιδας
 $M_L=4.3$ (9/7/84)
Στάθμη Πολυφύτου
 $h \sim 280m$

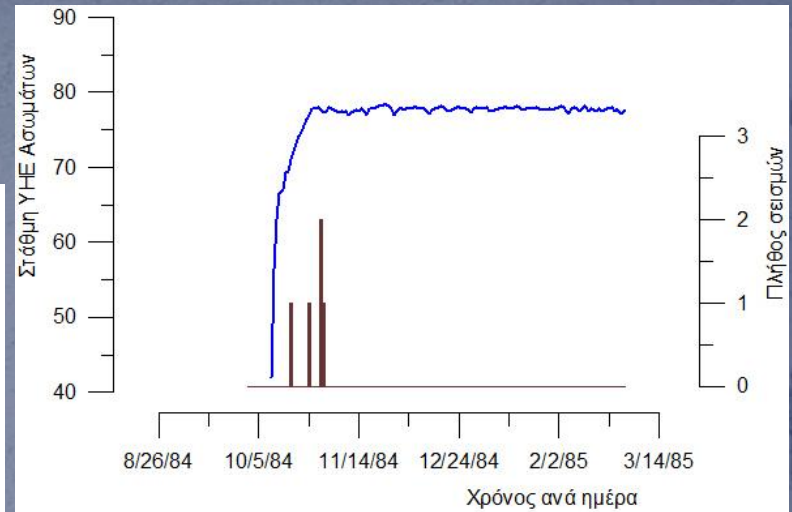
Έναρξη Πλήρωσης ΥΗΕ-Ασωμάτων

10/10/1984

Περίοδος 1/10/1984 – 28/2/1985

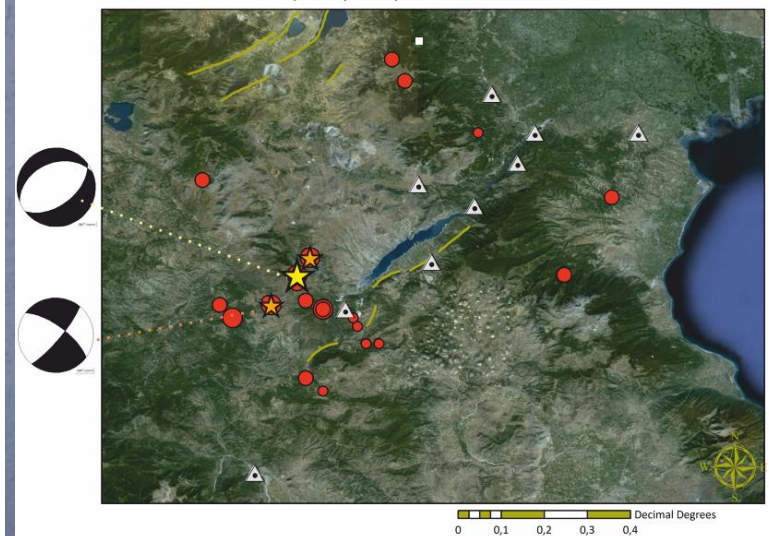


- Περίοδος 1/10/84-28/2/85
- Επίκεντρα σεισμών
- Ταξινόμηση ως προς Μέγεθος και βάθος
- | | | | |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------|
| ● M<=2, h<=5 km | ● 2<M<=3, 5<h<=10 km | ● 3<M<=4, 5<h<=10 km | ● 4<M<=5, 15<h<=25 km |
| ● M<=2, 5<h<=10 km | ● 2<M<=3, 10<h<=15 km | ● 3<M<=4, 10<h<=15 km | ● M>=5, 15<h<=25 km |
| ● M<=2, 10<h<=15 km | ● 2<M<=3, 15<h<=25 km | ● 3<M<=4, 15<h<=25 km | ▲ Σεισμολογικοί σταθμοί ΔΕΗ |
| ● M<=2, 15<h<=25 km | ● 2<M<=3, h>25 km | ● 3<M<=4, h>25 km | — Κύρια Ρήγματα |
| ● 4<M<=5, 10<h<=15 km | | | |

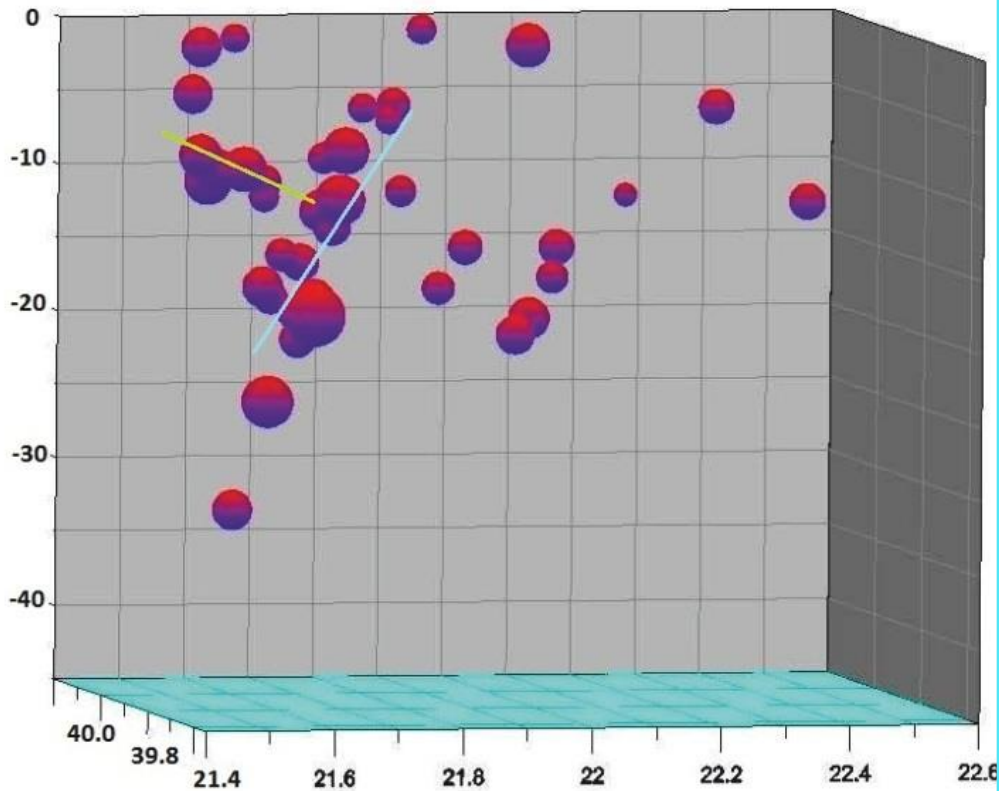


Διάγραμμα συσχέτισης πλήρωσης του ταμιευτήρα Ασωμάτων με σεισμικότητα περιοχής.

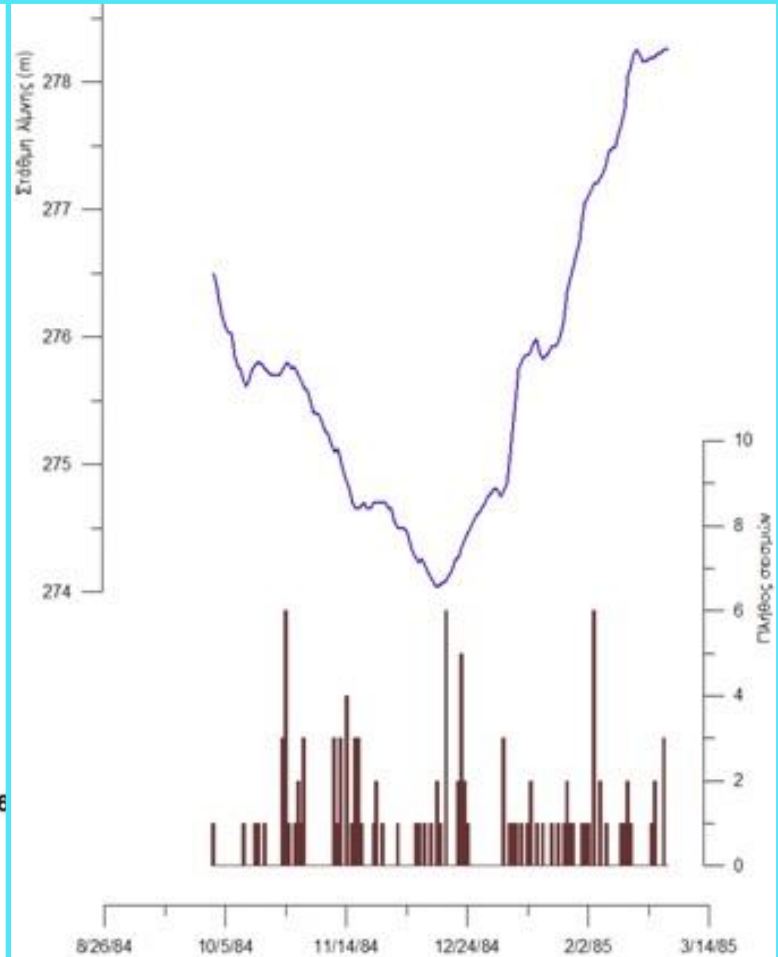
Σεισμικότητα περιόδου (Οκτώβριος 1984)



Χωρική κατανομή σεισμικών εστιών περιόδου 1/10/1984 – 30/11/1984

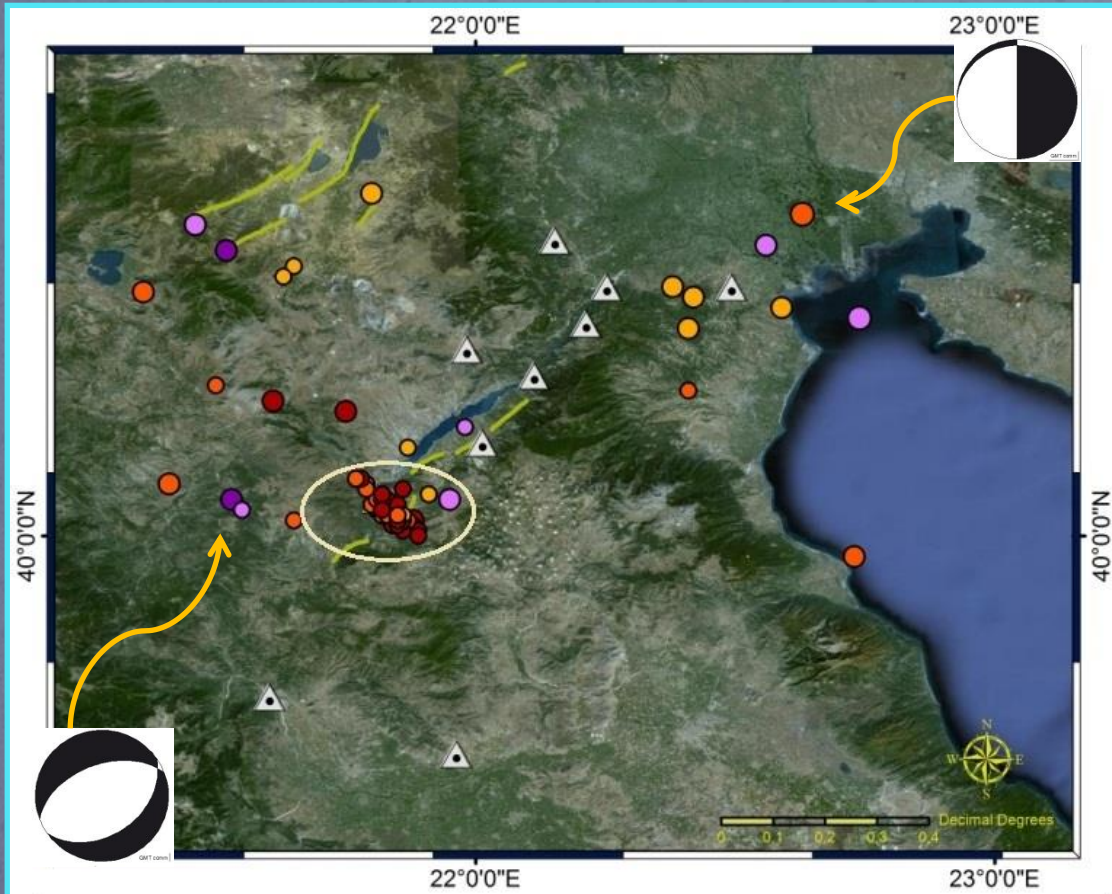


Κατανομή επικέντρων ως προς βάθος περιόδου
Οκτώβριος - Νοέμβριος 1984.



Έναρξη πλήρωσης ΥΗΕ-Σφηκιάς 13/3/1985

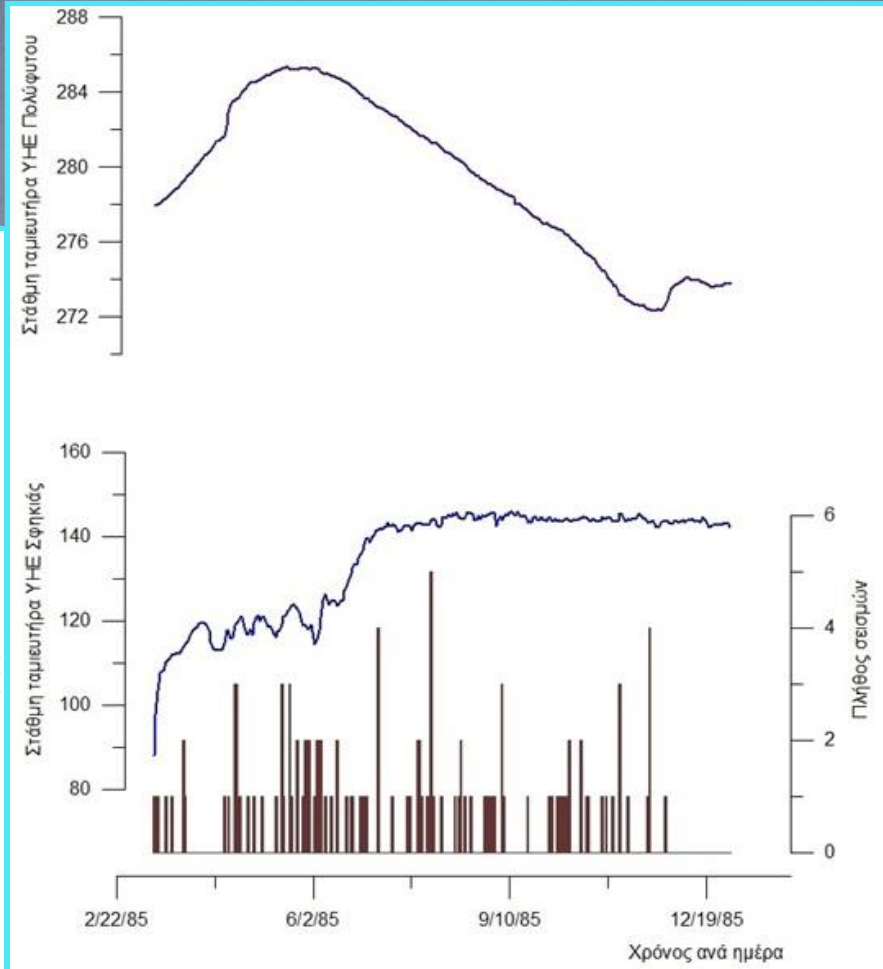
Περίοδος 1/3/1985 έως 31/7/1985



➤ $M_L=3.0$ στις
26/06/1985

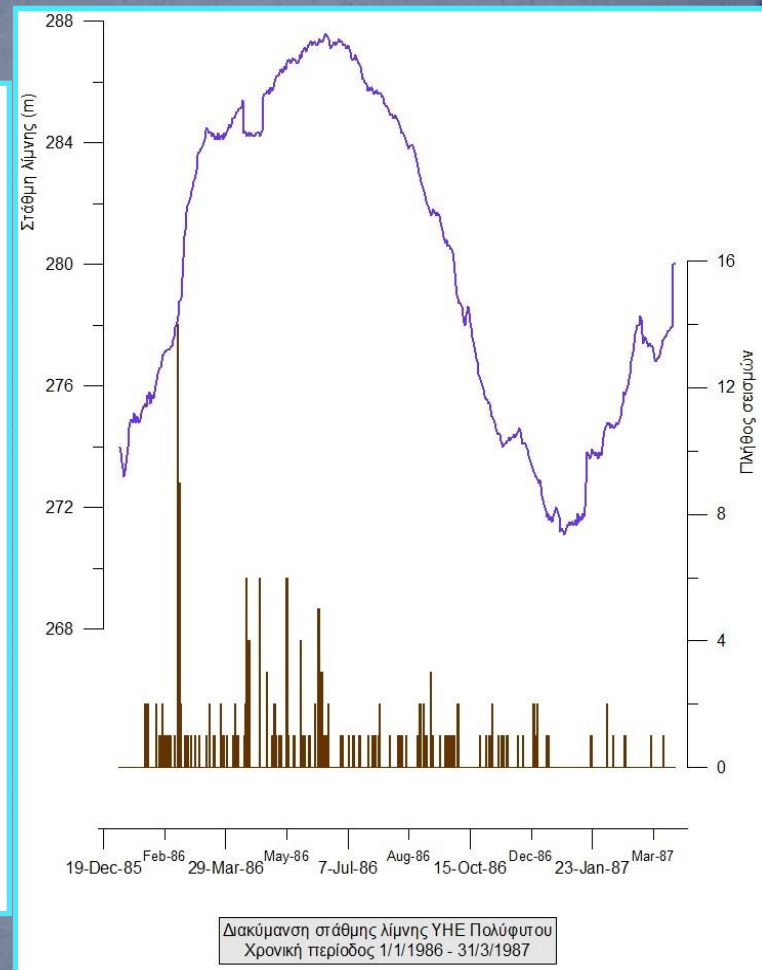
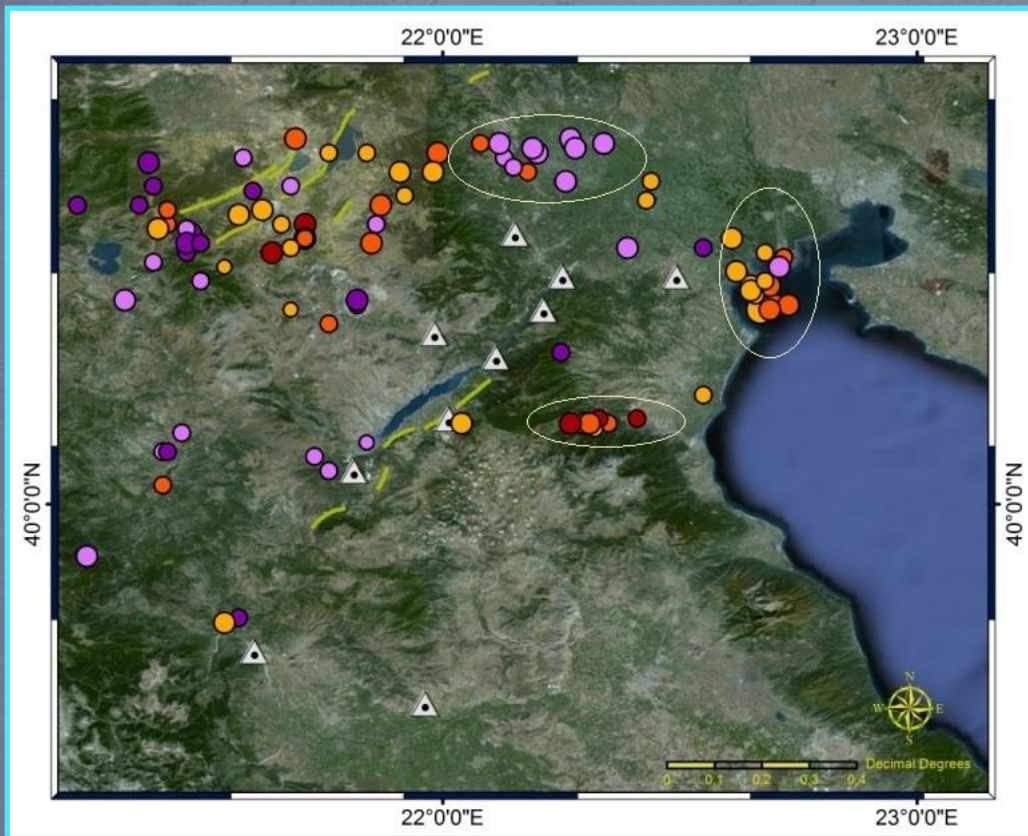
➤ $M_L=3.0$ στις
12/03/1985

Περίοδος 1/8/1985-
31/12/1985



Στις 1/8/1985 σεισμοί $M=3.6$, $M=3.5$, σε βάθη $h=24$, $h=16$
Στις 16/10/1985 σεισμός $M=2.8$ σε βάθος $h=10\text{Km}$

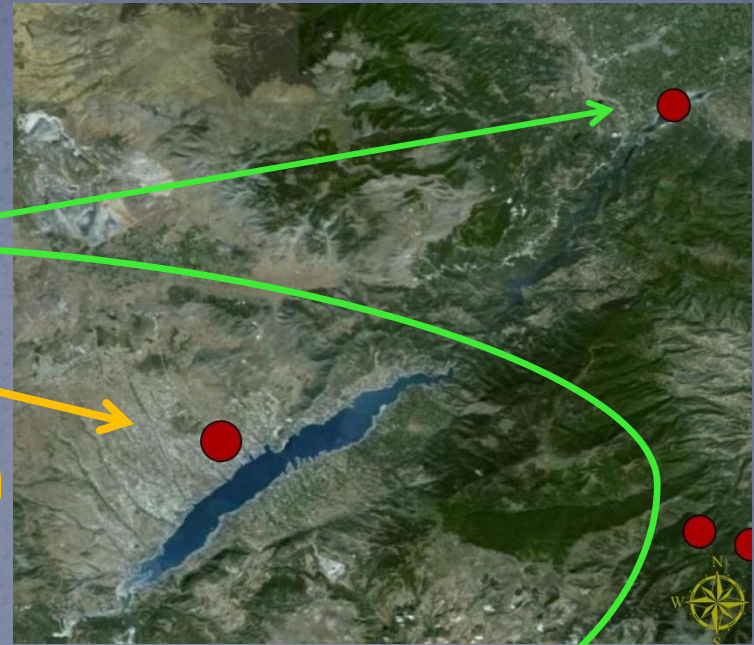
Περίοδος 1-1-86 έως 30-6-86



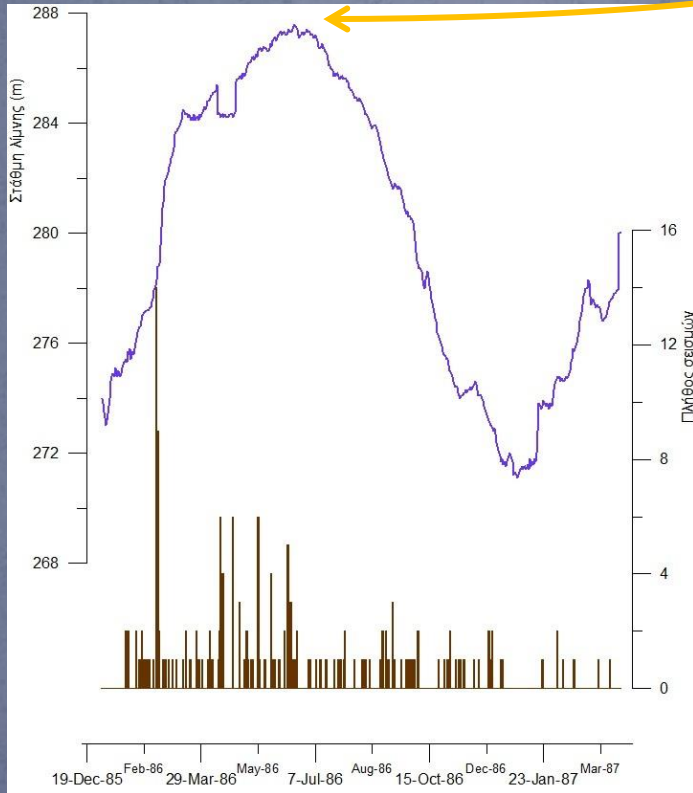
Σεισμοί σχετιζόμενοι με την διακύμανση της στάθμης των ταμιευτήρων Πολυφύτου και Σφηκιάς

➤ M=2.1, 20-8-86

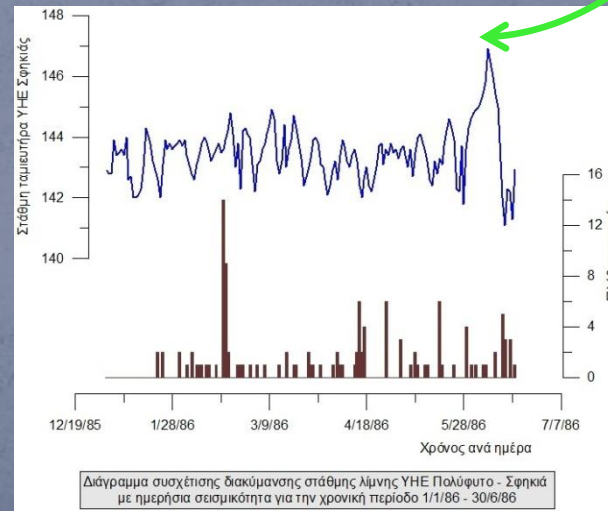
➤ M=2.8, 27-7-86



$\Delta h = 9,4m$

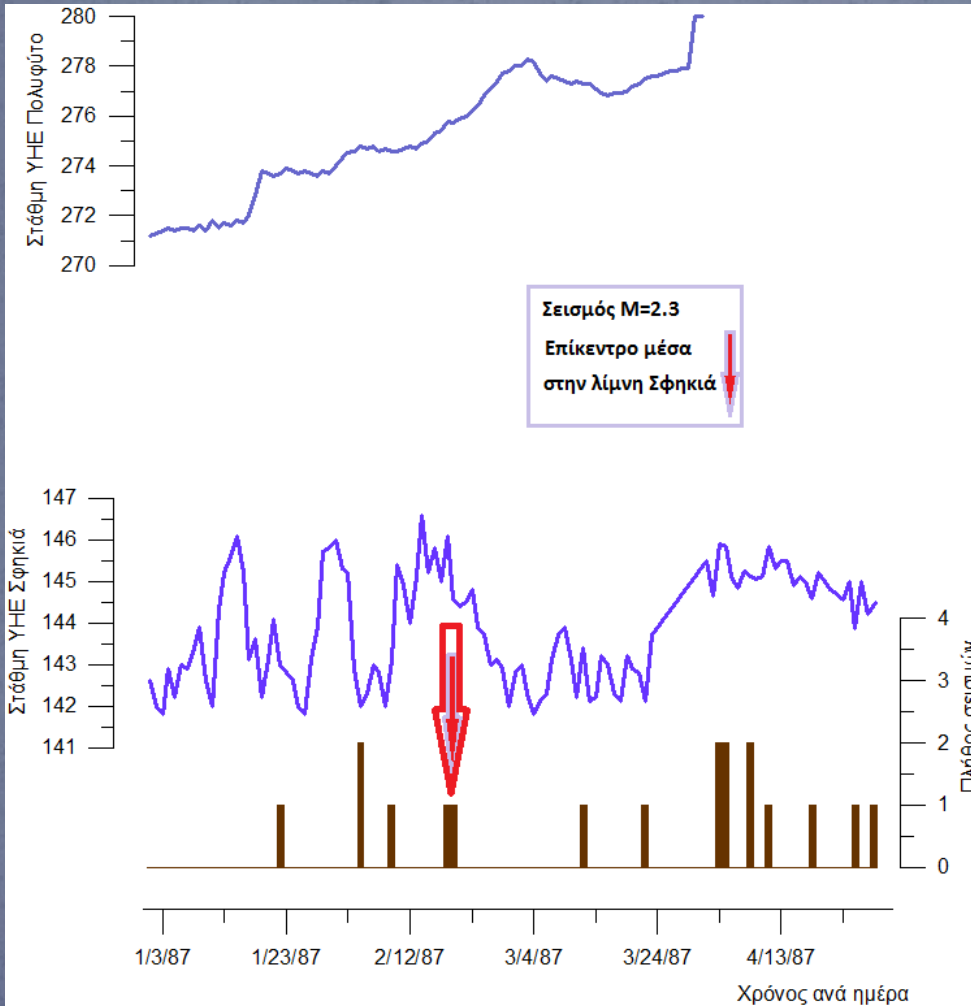


$\Delta h = 3,6m$



Διάγραμμα συσχέτισης διακύμανσης στάθμης λίμνης ΥΗΕ Πολυφύτου - Σφηκιά με ημερήσια σεισμικότητα για την χρονική περίοδο 1/1/86 - 30/6/86

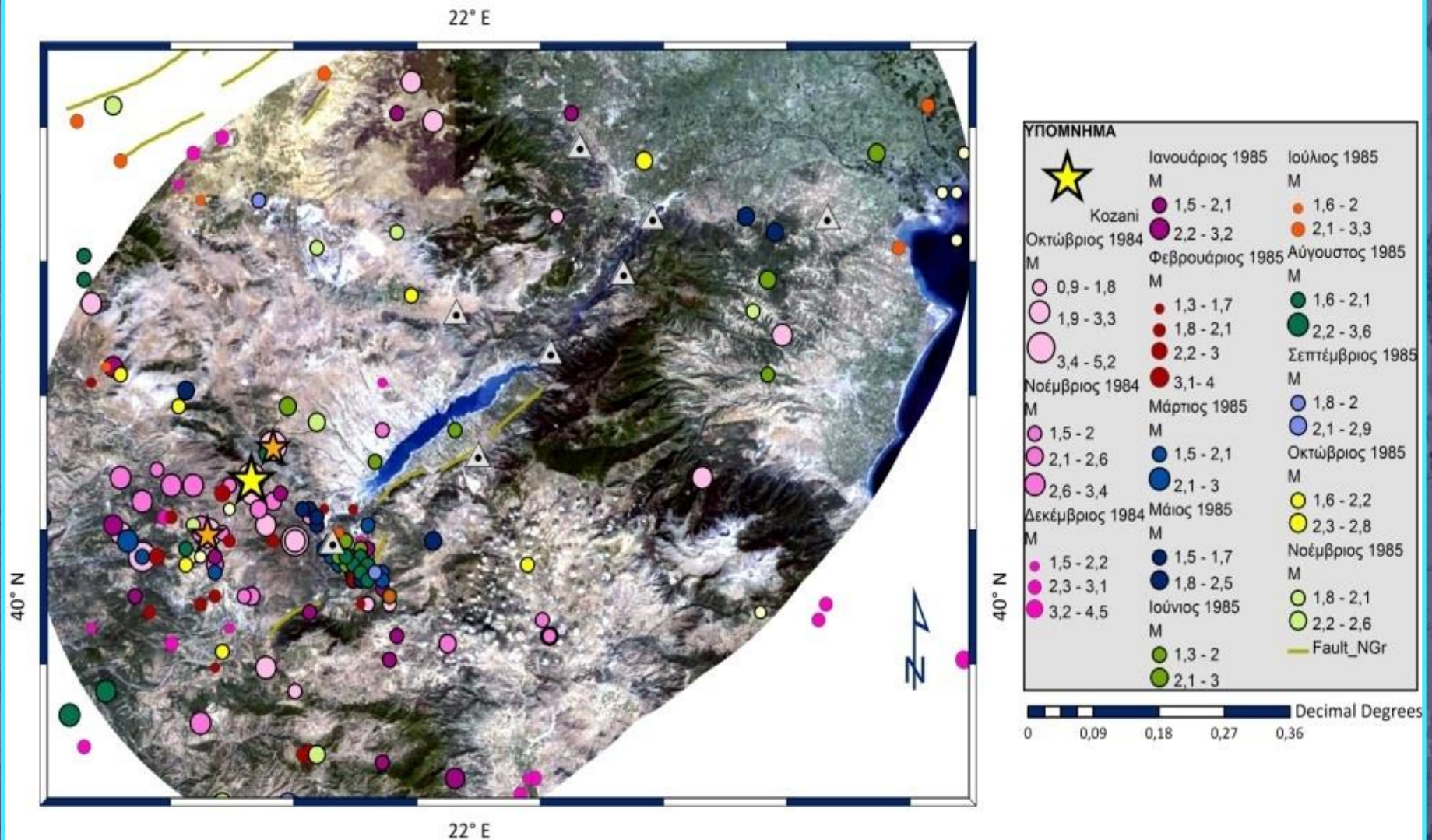
Περίοδος 1/1/87-30/4/1987



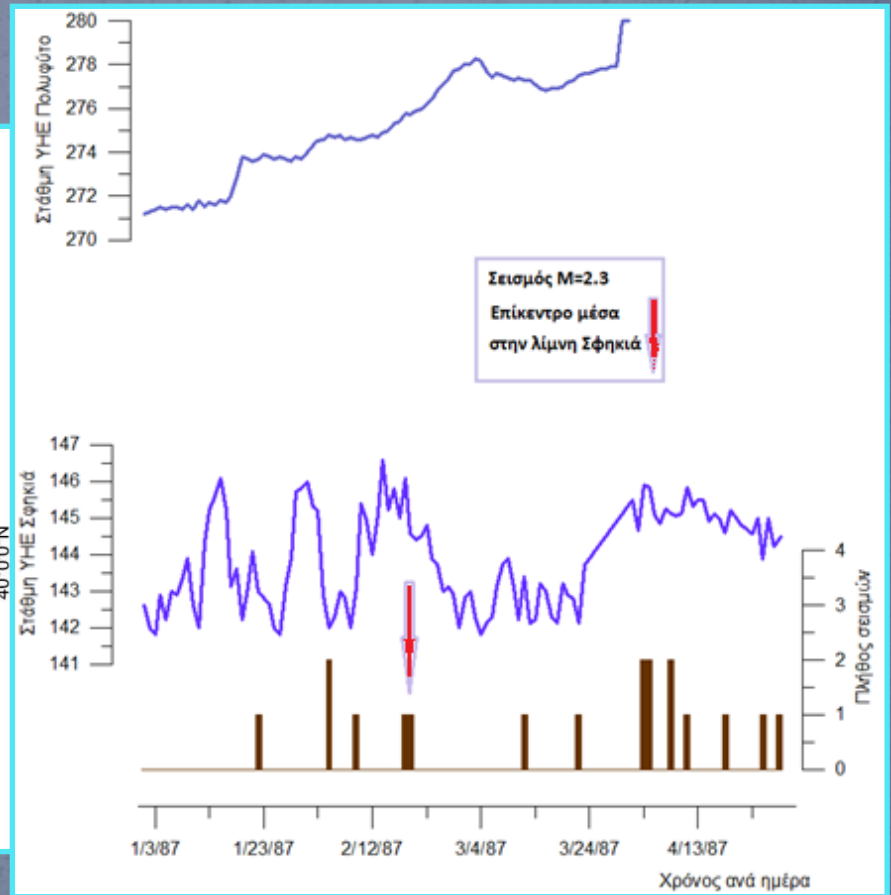
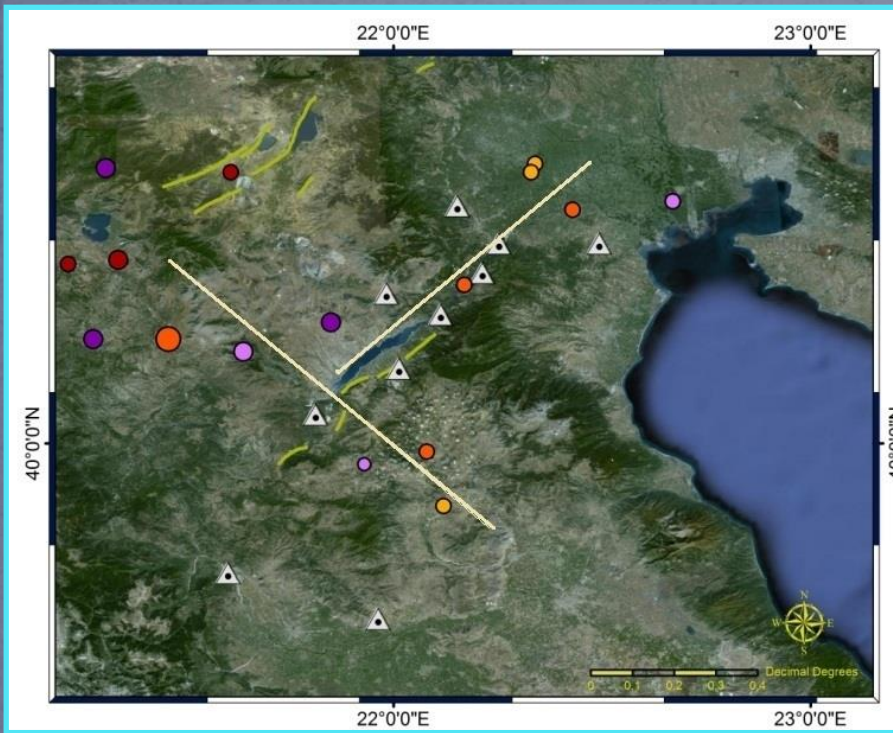
Σεισμός $M=2,3$ (18/2/87)
Βάθος=10Km

$\Delta h=4,1m$ ($\Delta t=10$ ημέρες)

Περίοδος 1/1/1985-30/11/1985

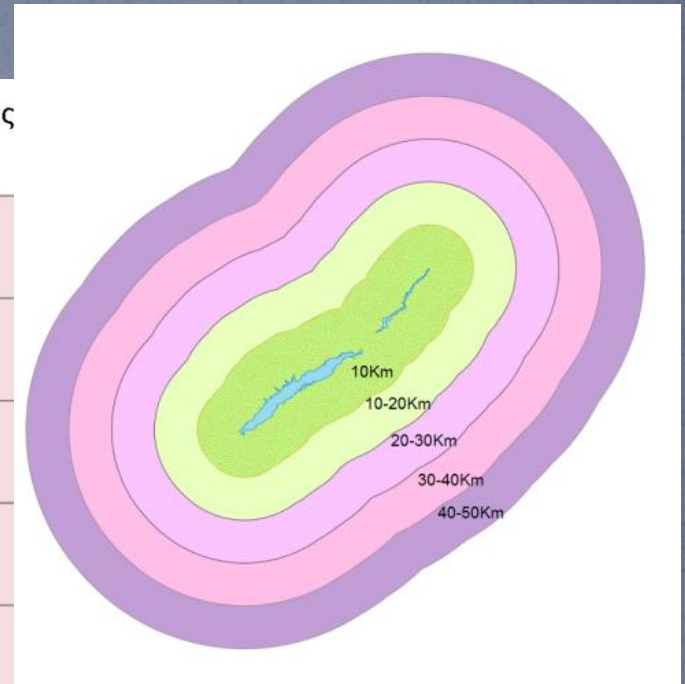
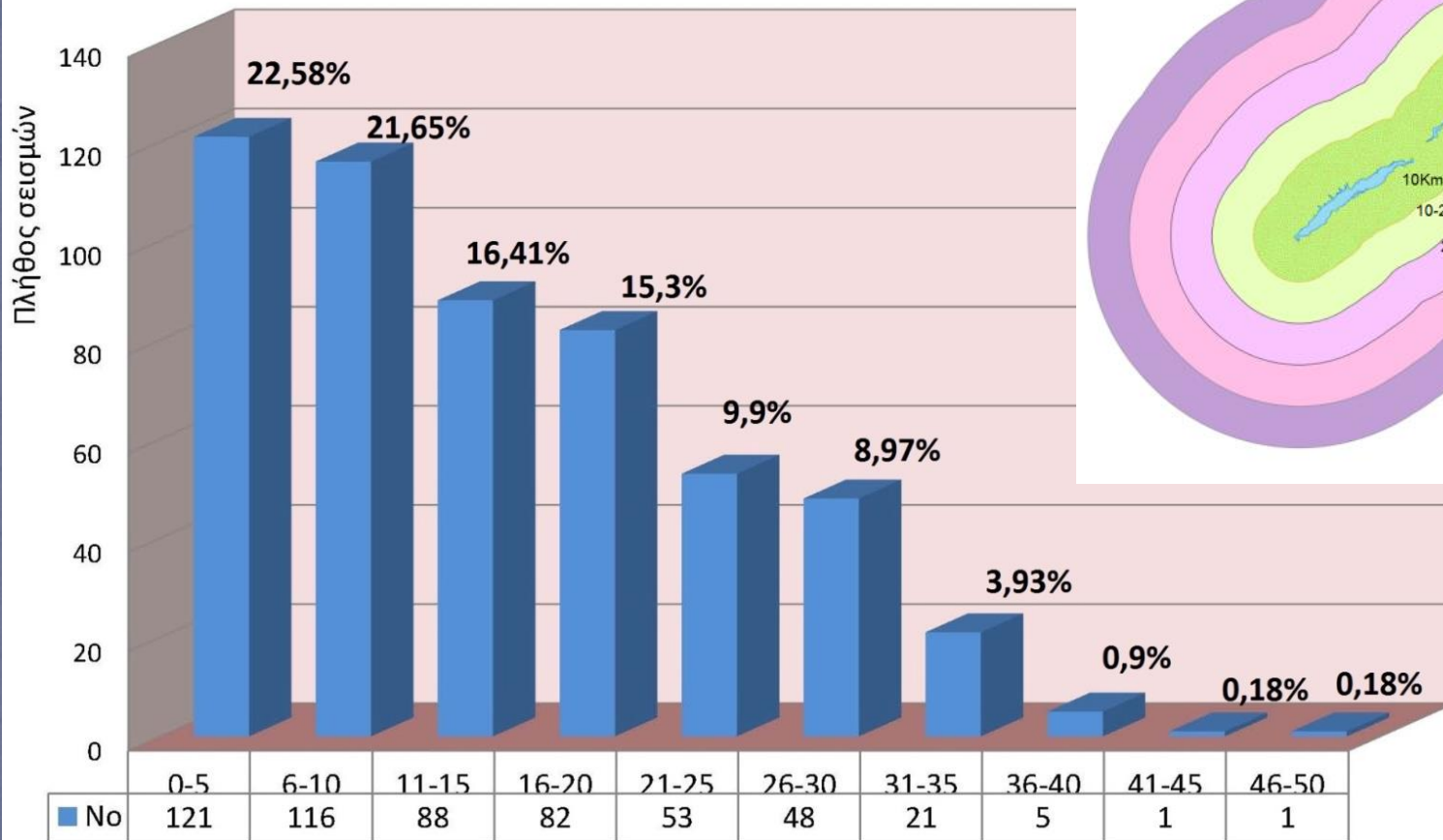


1/1/1987 – 31/4/1987

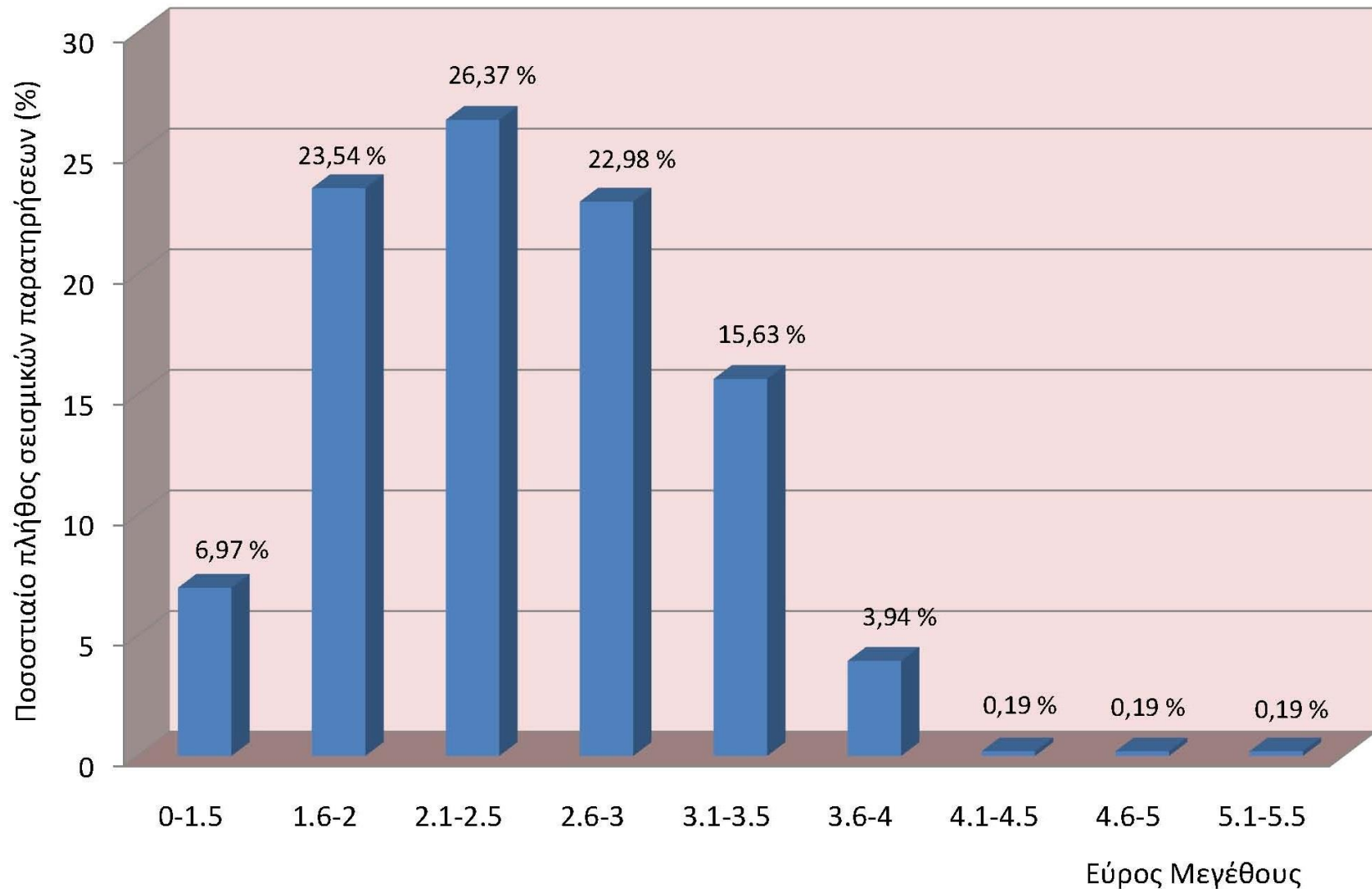


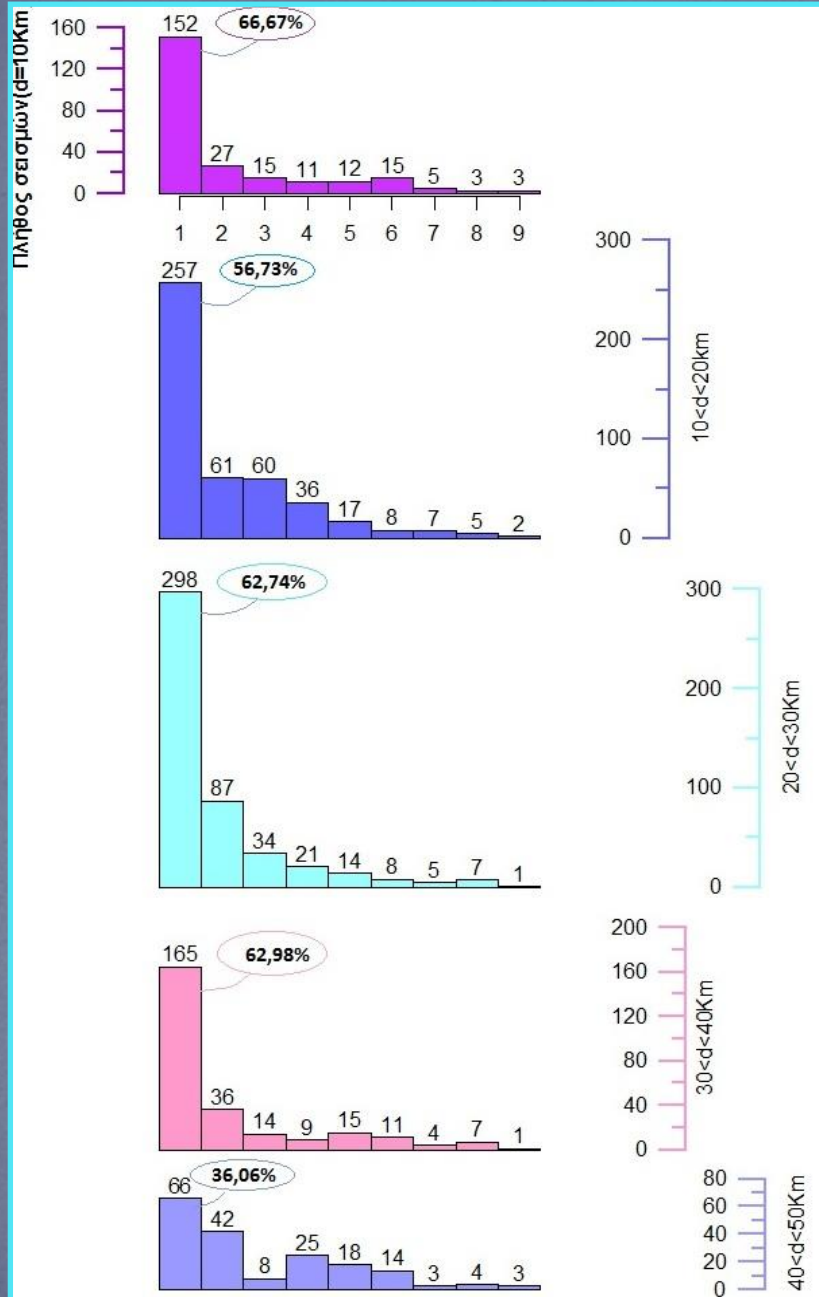
Κατανομή ως προς το βάθος

Κατανομή σεισμικότητας ως προς με το βάθος
Περίοδος 1/4/1984 - 30/4/1987



Κατανομή ως προς το μέγεθος





d, N, (Βάθος=0-5Km)

0-10Km , 152 (66,67%)

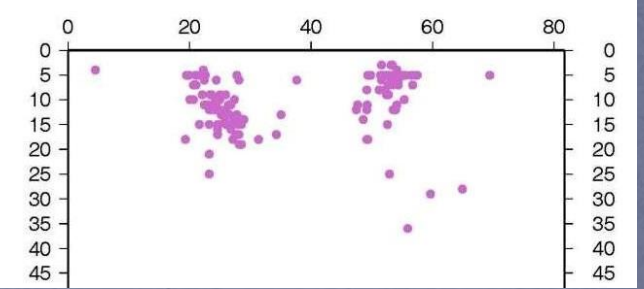
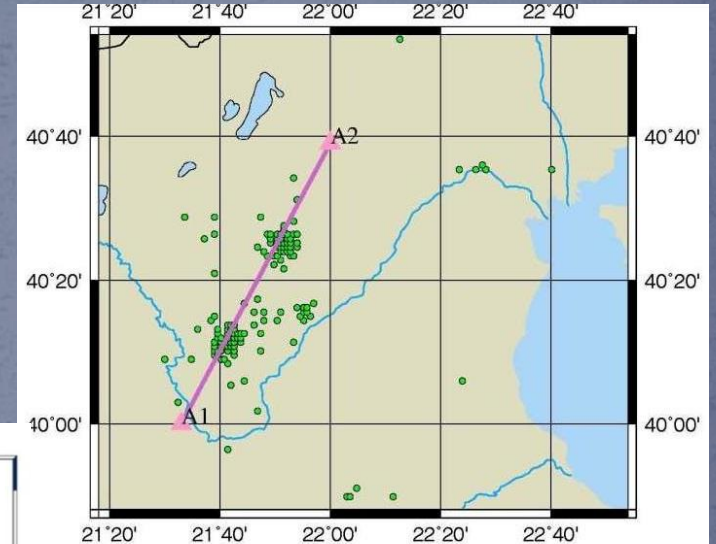
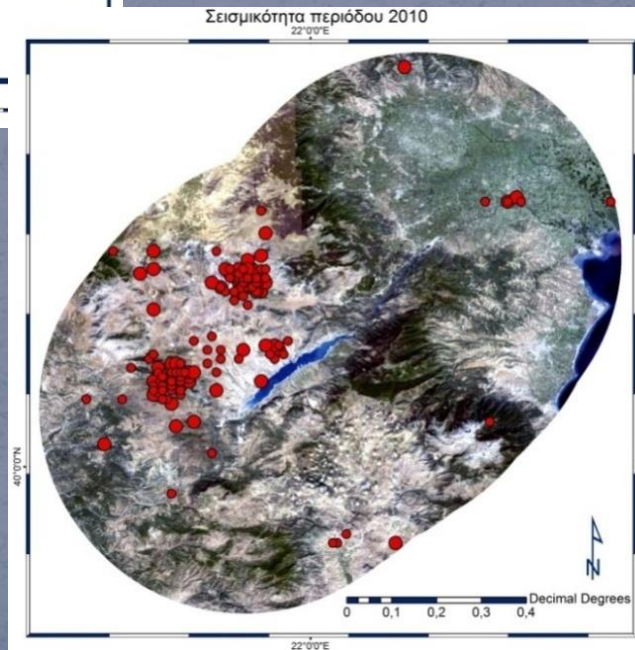
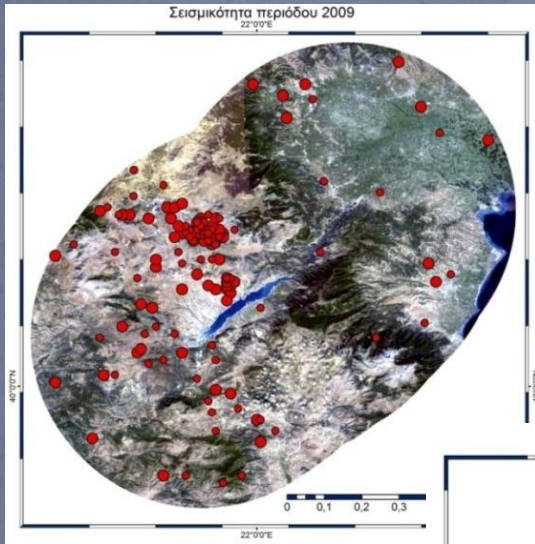
10-20Km, 257 (56,73%)

20-30Km, 298 (62,74%)

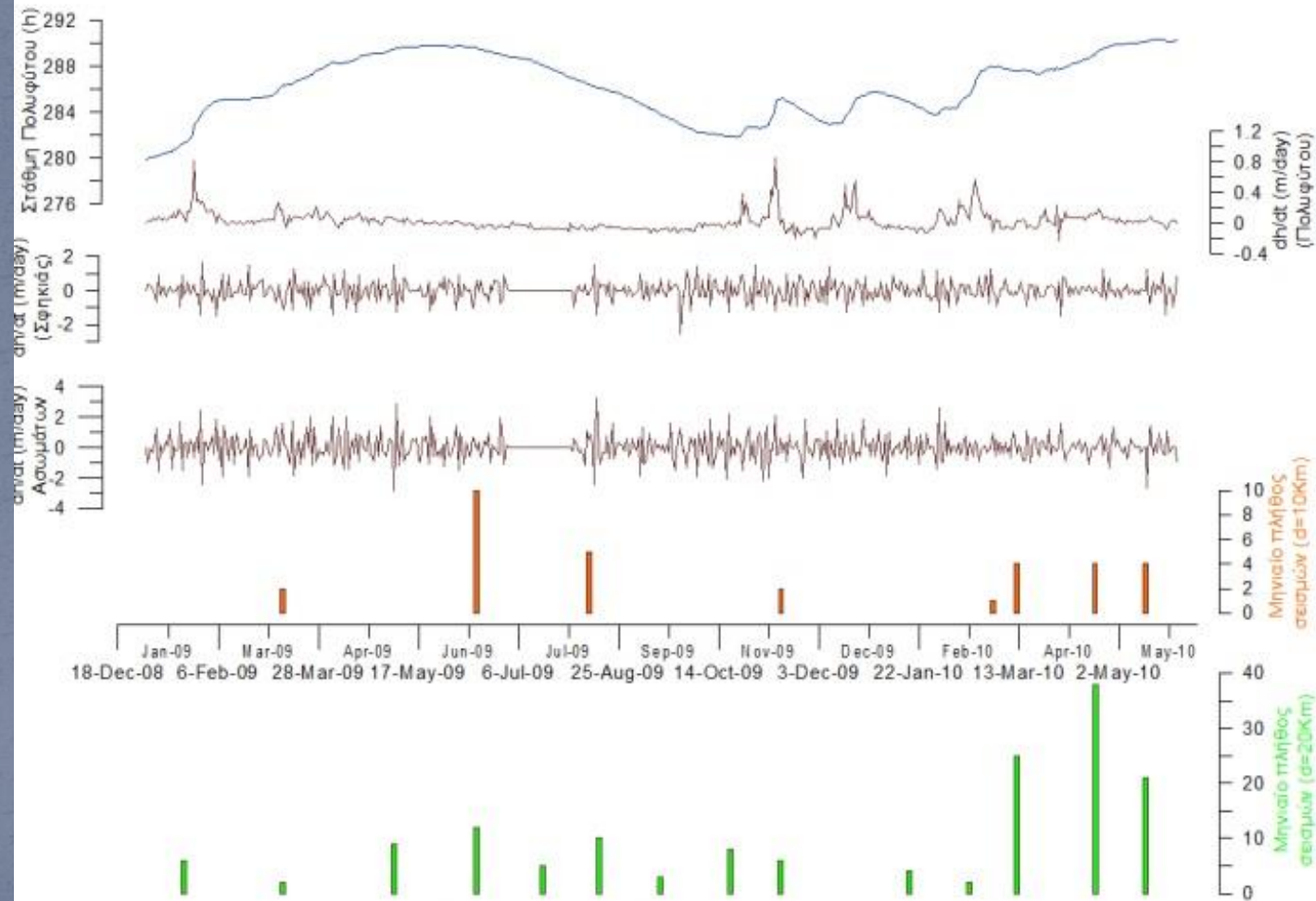
30-40Km, 165 (62,98%)

40-50Km, 66 (36,06%)

Σεισμικότητα περιόδου 2009-2010

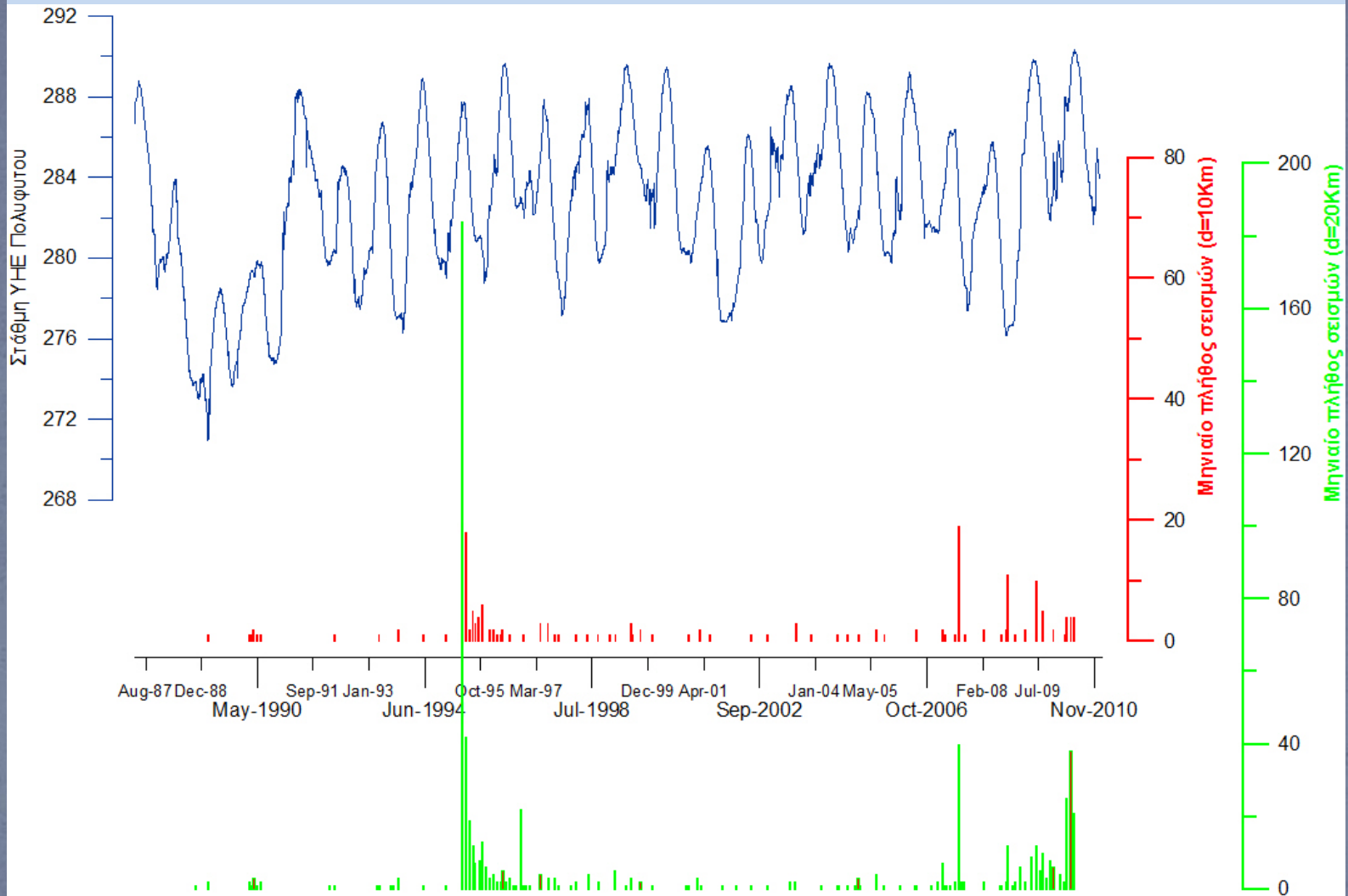


Διακύμανση στάθμης και ρυθμού μεταβολής Περίοδος 2009-2010



Διάγραμμα συσχέτισης στάθμης, ρυθμού μεταβολής της στάθμης και σεισμικότητας (d=10Km, d=20Km)
Χρονική περίοδος 1999 έως Μάιο 2010

Περίοδος 1988 - 2010



Διάγραμμα συσχέτισης σεισμικότητας με διακύμανση στάθμης για αποστάσεις $d=10\text{Km}$ και $d=20\text{Km}$.
Χρονική περίοδος 1987-2010

Σας ευχαριστώ
για την
προσοχή σας