



**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ
ΚΡΗΤΗΣ**



**ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΧΑΝΙΑ**

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ Τ.Ε.

**ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΑΣ**



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Εδαφική σεισμική απόκριση των υπερκείμενων σχηματισμών με γεωφυσικές μεθόδους, στην ευρύτερη περιοχή του Αγίου Ονουφρίου, της Δημοτικής Ενότητας Ακρωτηρίου της περιφέρειας Χανίων.»

Πέγγα Γεωργία

Επιβλέπων καθηγητής

**Παπαδόπουλος Ηλίας
Καθηγητής Εφαρμογών**

ΧΑΝΙΑ 2015



**TECHNOLOGICAL EDUCATIONAL INSTITUTE
OF CRETE**

**SCHOOL OF APPLIED SCIENCES
HANIA**

**DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL AND NATURAL RESOURCES
ENGINEERING**

**SECTION OF WATER RESOURCES AND GEOENVIRONMENT
LABORATORY OF GEOPHYSICS AND SEISMOLOGY**



THESIS

**“ Seismic Response of superficial sediments using geophysical methods in the broader area of Agios Onoufrios,
Akrotiri, Chania”**

Pegga Georgia

**Supervisor
Papadopoulos Ilias
Lecturer**

Hania 2015

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

1. Εξεταστής Παπαδόπουλος Ηλίας
2. Εξεταστής Σουπιός Παντελεήμων
3. Εξεταστής Βαλλιανάτος Φίλιππος



Η διπλωματική εργασία υλοποιήθηκε στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος "Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση", Πράξη Αρχιμήδης III και συγχρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και εθνικούς πόρους (Εθνικό Στρατηγικό Πλαίσιο Αναφοράς 2007-2013).

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι φυσικές καταστροφές μπορεί να είναι ισχυροί και εξέχοντες μηχανισμοί έκλυσης άμεσα και έμμεσα επικίνδυνων υλικών (hazmat). Τα επικίνδυνα υλικά που εκλύονται ως αποτέλεσμα μιας τεχνολογικής δυσλειτουργίας που επιταχύνεται από ένα φυσικό γεγονός, αναφέρονται ως na-tech γεγονότα. Τα Na-tech γεγονότα δημιουργούν μοναδικούς περιβαλλοντικούς και της ανθρώπινους κινδύνους. Οι καταστροφές που σχετίζονται με επικίνδυνα υλικά είναι ανησυχητικές, δεδομένης της αύξησης στην πυκνότητα του πληθυσμού και την επιτάχυνση της βιομηχανικής ανάπτυξης σε περιοχές που υπόκεινται σε φυσικές καταστροφές. Αυτές οι τάσεις αυξάνουν την πιθανότητα μελλοντικών καταστροφικών ζημιών και το ενδεχόμενο για μαζική έκθεση των ανθρώπων σε επικίνδυνα υλικά που απελευθερώνονται κατά τη διάρκεια καταστροφών. Αυτό οδηγεί στην ανάγκη για μελέτη των εδαφών των εν λόγω περιοχών σε σχέση με την εδαφική απόκριση σε διέγερση τους από σεισμική πηγή, αλλά και την τρωτότητα των βιομηχανικών περιοχών και των περιοχών αποθήκευσης υγρών καυσίμων με σκοπό την αποφυγή των περιβαλλοντικών απειλών και τις προσπάθειες για μετριασμό των ζημιών και την πρόληψη.

Μια από αυτές τις ταχύτατα αναπτυσσόμενες περιοχές οικιστικά, τουριστικά αλλά και ως περιοχή αποθήκευσης υγρών καυσίμων, βρίσκεται στο Νομό Χανίων, στην περιοχή του Αγίου Ονουφρίου, Ακρωτηρίου. Στην εν λόγω περιοχή φιλοξενούνται παράκτιες δεξαμενές αποθήκευσης υγρών καυσίμων, οι οποίες ανεφοδιάζονται υποθαλάσσια, ενώ η οικιστική περιοχή είναι σε απόσταση αρκετών μέτρων και η παραλία του Αγ. Ονουφρίου έλκει αρκετούς κολυμβητές τους καλοκαιρινούς μήνες. Βρίσκεται σε μια ενεργό τεκτονική περιοχή, πάσχει από $?!?!?$ μεγέθους σεισμούς. Η συμβολή μας στον περιορισμό του σεισμικού κινδύνου περιλαμβάνει μικροζωνική μελέτη με χρήση του περιβάλλοντος σεισμικού θορύβου (microtremors), καθώς και γεωλογικές πληροφορίες και την από κοινού ανάλυση των δεδομένων που συλλέγονται κατά τη διάρκεια αυτού του πειράματος πεδίου. Μία ανάλυση αυτών των δεδομένων με τη χρήση του οριζόντιου προς κατακόρυφο (H / V) φασματική τεχνική αναλογία οδήγησαν στα ακόλουθα συμπεράσματα:

ABSTRACT

Natural disasters may be powerful and prominent mechanisms of direct and indirect hazardous material (hazmat) releases. Hazardous materials that are released as the result of a technologic malfunction precipitated by a natural event are referred to as natural-technologic or na-tech events. Na-tech events pose unique environmental and human hazards. Disaster-related hazardous material releases are of concern, given increases in population density and accelerating industrial development in areas subject to natural disasters. These trends increase the probability of catastrophic future disasters and the potential of mass human exposure to hazardous materials released during disasters. This leads to the need for study of soils of these areas in relation to territorial response to the stimulation by a seismic source, and the vulnerability of industrial areas and atmospheric oil and fuel storage tank farms to avoid environmental threats and efforts to mitigate damage and prevention.

One of these fastest growing residential areas and tourism regions, as well as atmospheric storage tank farms, is located in Chania, at St. Onoufrios, Akrotiri. In this region, is hosted, a coastal tank farm and distribution area, which restocked underwater, while the residential area is located several meters away and the beach of St. Onoufrios attracts many swimmers during the summer season. Situated in an active tectonic region, suffers from large sized earthquakes. Our contribution to the mitigation of earthquake risk includes a microzonation study using ambient seismic noise (microtremors), as well as geological information and the joint analysis of the data collected during this field experiment. An analysis of these data using the horizontal-to-vertical (H/V) spectral ratio technique led to the following conclusions:

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	4
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ.....	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΜΕΘΟΔΟΣ ΦΑΣΜΑΤΙΚΟΥ ΛΟΓΟΥ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΠΡΟΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ ΕΔΑΦΙΚΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ.....	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5- ΣΥΝΟΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	

Η διασπορά πετρελαίου, η ρύπανση από αγροχημικά, η σκόνη αμιάντου και των αερολυμένων ραδιονουκλιδίων μπορεί να μην είναι οι κίνδυνοι που έρχονται αμέσως στο νου όταν εξετάζουμε τα είδη των ζημιών που συνδέονται με μια φυσική καταστροφή. Ωστόσο, αυτές οι απειλές είναι τόσο πραγματικές όσο και εκείνες που δημιουργούνται από μετακινούμενα νερά πλημμύρας, κατεστραμμένα οδοστρώματα ή καταρρέοντα κτίρια. Επικίνδυνα υλικά (Hazardous Materials) που απελευθερώνονται κατά τη διάρκεια ακραίων φυσικών φαινομένων (π.χ. ηφαιστειακές εκρήξεις, σεισμούς, κατολισθήσεις, τυφώνες, ανεμοστρόβιλοι, χιονοθύελλες) απειλούν την ανθρώπινη υγεία, αυξάνοντας την πιθανότητα άτομα να είναι εκτεθειμένα σε επικίνδυνα υλικά ή δευτερογενείς κινδύνους, όπως πυρκαγιές ή εκρήξεις που προκύπτουν όταν εύφλεκτα υλικά αναφλέγονται (Binder και Sanderson, 1987). Οι ανησυχίες σχετικά με τις εκλύσεις hazard που προκύπτουν από φυσικές καταστροφές έχουν αυξηθεί πρόσφατα λόγω της αύξησης του αριθμού των φυσικών καταστροφών, καθώς και στις αυξήσεις στην πυκνότητα του πληθυσμού σε περιοχές επιρρεπείς σε καταστροφές, αλλά και τεχνολογική και βιομηχανική επέκταση (Noji, 1997. IFRC, 2001. Wijkman και Timberlake, 1984). Αυτά τα φαινόμενα αυξάνουν την πιθανότητα καταστροφικών ζημιών και την προοπτική ανθρώπινης έκθεσης σε επικίνδυνες ουσίες που απελευθερώνονται κατά τη διάρκεια καταστροφών. Η έλλειψη τήρησης τυποποιημένων αρχείων, ωστόσο, έχει εμποδίσει τις προσπάθειες για εκτίμηση της συχνότητας και της σοβαρότητας των περιστατικών hazard που προκύπτουν κατά τη διάρκεια φυσικών καταστροφών. Ως εκ τούτου, εξακολουθούν να υπάρχουν ερωτήματα σχετικά με τις πιθανές απορρίψεις επικίνδυνων υλικών μετά από πολλές φυσικές καταστροφές (White, 1993). Το πιο επείγον από τα ερωτήματα αυτά, από τη μεριά της δημόσιας υγείας, παραμένει στο κατά πόσο οι καταστροφές που συνδέονται με την απελευθέρωση hazard θα μπορούσαν ενδεχομένως να επηρεάσουν την ανθρώπινη υγεία. Εκλύσεις μεγάλης κλίμακας μπορούν να δημιουργήσουν τεράστιο πρόβλημα ρύπανσης του νερού, του εδάφους και του αέρα, καθώς και εκτεταμένες απειλές για πυρκαγιές και εκρήξεις που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε οξεία ή χρόνια έκθεση και δυσμενή αποτελέσματα για την υγεία για των κατοίκων που γειτνιάζουν σε τόπους καταστροφής (Sanderson, 1992).

Χημικά, ακτινολογικές και βιολογικές εκλύσεις κατά τη διάρκεια φυσικών καταστροφών έχουν καταγραφεί από επιστημονικά περιοδικά και εθνικές και τοπικές πηγές ειδήσεων. Οι εκθέσεις αυτές δείχνουν ότι η φυσικές καταστροφές που συνδέονται με εκλύσεις hazard δεν είναι σπάνιες και ότι οι πλημμύρες, οι σεισμοί και οι ηφαιστειακές εκρήξεις πιθανότατα εμφανίζουν τον μεγαλύτερο κίνδυνο για πραγματικές ή δυνητικές συνέπειες.

Η ποσοτική εκτίμηση της επικινδυνότητας των βιομηχανικών εγκαταστάσεων βασίζεται σε ολοκληρωμένες διαδικασίες για την ποσοτικοποίηση των ανθρωπίνων, οικολογικών και οικονομικών απωλειών που συνδέονται με τα σχετικά ατυχήματα. Κατά συνέπεια, η ανάλυση του σεισμικού κινδύνου θα πρέπει να ολοκληρωθεί προκειμένου να αποκτηθούν αξιόπιστα αποτελέσματα. Έτσι, δημιουργήθηκε η ανάγκη για την εκπόνηση αυτής της πτυχιακής εργασίας, στην οποία θα παρατεθούν εκτιμήσεις για το χαρακτηρισμό των εδαφών της περιοχής του Αγίου Ονουφρίου, Ακρωτηρίου Χανίων σε σχέση με την εδαφική απόκριση σε διέγερση τους από σεισμική πηγή, αλλά και την τρωτότητα των δεξαμενών αποθήκευσης υγρών καυσίμων (atmospheric storage tanks) που υπόκεινται σε σεισμικές δράσεις. Η εν λόγω περιοχή είναι ταχύτατα αναπτυσσόμενη, ενώ φιλοξενεί και πάρα δεξαμενών αποθήκευσης υγρών καυσίμων (atmospheric storage tank farms), τροφοδοτούμενες από θαλάσσης μέσω δικτύου υπόγειων αγωγών.

Για το σκοπό αυτό διενεργήθηκαν μετρήσεις εδαφικού θορύβου μονού σταθμού σε όλη την περιοχή για την εύρεση του φασματικού λόγου της οριζόντιας προς την κατακόρυφη συνιστώσα του εδαφικού θορύβου.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια συνοπτική εισαγωγή στις έννοιες και τη φύση του εδαφικού θορύβου και τις μεθόδους και τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί ως τώρα για τη μελέτη των τοπικών εδαφικών συνθηκών, κάποιες αναφορές στη σεισμική απόκριση των δεξαμενών αποθήκευσης υγρών καυσίμων και πετρελαιοειδών και των υπόγειων δικτύων σωληνώσεων τους.

Στο δεύτερο κεφάλαιο ακολουθεί η παρουσίαση της γεωλογικής δομής της ευρύτερης αλλά και ειδικότερης περιοχής της πόλης των Χανίων, το ενεργό γεωτεκτονικό καθεστώς υπό το οποίο βρίσκεται.

Στο τρίτο και στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύεται εκτενώς η μέθοδος του φασματικού λόγου της οριζόντιας προς την κατακόρυφη συνιστώσα του εδαφικού θορύβου και η εφαρμογή της στην περιοχή έρευνας, μέσω του πειραματικού μέρους. Παρουσιάζονται, επίσης, τα όργανα μέτρησης, καθώς και το

λογισμικό επεξεργασίας του εδαφικού θορύβου. Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων γίνεται υπό μορφή χωρικών χαρτών χρωματικής κλίμακας. Συνδέονται τα διαθέσιμα γεωλογικά και εδαφολογικά στοιχεία και επιχειρείται η σύνδεση του πάχους των σχηματισμών με τη θεμελιώδη συχνότητα τους.

Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται σύνοψη των αποτελεσμάτων που προέκυψαν και η σύνθεση τους για τη εξαγωγή των γενικών συμπερασμάτων της επίδρασης των τοπικών εδαφικών συνθηκών και διατυπώνονται συνολικά τα συμπεράσματα που έχουν προκύψει από το σύνολο της έρευνας.

Όπως, έχει προαναφερθεί, η περιοχή του Αγίου Ονουφρίου, Ακρωτηρίου, εμπεριέχει κτιριακές εγκαταστάσεις και δεξαμενές αποθήκευσης υγρών καυσίμων και πετρελαιοειδών. Για την ολοκληρωμένη μελέτη και παράθεση αποτελεσμάτων ήταν υποχρεωτική η λήψη μετρήσεων μέσα στις εγκαταστάσεις. Λόγω ευαίσθητου χαρακτήρα των πληροφοριών και μετά από ιδιωτικό συμφωνητικό τήρησης εχεμύθειας, οι μετρήσεις, όπως και τα αποτελέσματα που αφορούν τις συγκεκριμένες εγκαταστάσεις, θα ληφθούν υπόψη για την εξαγωγή συμπεράσματος, αλλά δε θα παρατεθούν.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

Μεγάλο μέρος του ευρωπαϊκού εδάφους επηρεάζεται από σημαντική σεισμική επικινδυνότητα. Από την άλλη πλευρά, οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις απαιτούν υποχρεωτική αξιολόγηση του κινδύνου και ανάπτυξη προληπτικών και προστατευτικών μέτρων. Παρόλα αυτά, όταν πρόκειται για βιομηχανικές εγκαταστάσεις και συγκεκριμένα βιομηχανίες χημικών, πετροχημικών και επεξεργασίας πετρελαίου, η αλληλεπίδραση του σεισμού με τον εξοπλισμό μπορεί να προκαλέσει σχετικά ατυχήματα με αποτέλεσμα την έκλυση επικίνδυνων υλικών (πυρκαγιές, εκρήξεις), τραυματίζοντας τους ανθρώπους και αυξάνοντας τη συνολική ζημιά στην κοντινή περιοχή, είτε άμεσα, είτε μέσω διαδοχικών αποτελεσμάτων («domino effects»).

Κατά συνέπεια, η ποσοτική ανάλυση του κινδύνου (QRA) των βιομηχανικών εγκαταστάσεων πρέπει να λαμβάνει, δεόντως, υπόψη τους πολλαπλούς κινδύνους που απειλούν τον κρίσιμο εξοπλισμό, ο οποίος μπορεί ενδεχομένως να οδηγήσει σε καταστροφικά αποτελέσματα. Παρά τις εκτιμήσεις, οι διαδικασίες των μηχανικών, οι οποίοι είναι σε θέση να αξιολογήσουν ποσοτικά την επίδραση της σεισμικής δράσης, δεν είναι καλά αποδεδειγμένες. Πράγματι, σχετικά βιομηχανικά ατυχήματα μπορεί να προκληθούν από την απώλεια της συγκράτησης μετά από ανακίνηση του εδάφους ή άλλων σχετικών φυσικών καταστροφών, είτε άμεσα είτε μέσω αλυσιδωτών (cascade) αποτελεσμάτων ('domino effects').

Όμως, για την ανάλυση, ποσοτικοποίηση και επεξήγηση των αποτελεσμάτων, θα πρέπει να αναφερθούν, πρώτα, οι έννοιες, οι ορισμοί και οι βασικές αρχές στις οποίες θα στηριχθεί η παρούσα αναλυτική έκθεση.

Φυσικός κίνδυνος (Natural Hazard) είναι κάθε φυσικό φαινόμενο ή φυσική διαδικασία που ενέχει κάποια πιθανότητα να προκαλέσει μικρής ή μεγάλης κλίμακας καταστροφή στο ανθρωπογενές ή/και στο φυσικό περιβάλλον. Για παράδειγμα ένας σεισμός 3R είναι ένα φυσικό γεγονός που έχει μηδαμινή πιθανότητα να προκαλέσει έστω και μικρή (ζημιά) καταστροφή. Για αυτό δε συνιστά φυσικό κίνδυνο. Το ίδιο ισχύει και για ελαφρύ άνεμο έντασης 2-3 Beaufort. Όμως, σεισμός 7R ή άνεμος 9 Beaufort έχουν σημαντική πιθανότητα να προκαλέσουν καταστροφή και για αυτό συνιστούν φυσικούς κινδύνους. Οι φυσικοί κίνδυνοι, ανάλογα με τις αιτίες που τις προκαλούν, διακρίνονται σε Γεωλογικούς, Υδρολογικούς, Κλιματικούς, Διαστημικούς, τις Πυρκαγιές και τις σχετικούς με την Υγεία και τις Ασθένειες.

Τεχνολογικός ή ανθρωπογενής κίνδυνος (Technological Hazard) είναι κάθε τεχνολογική δραστηριότητα του ανθρώπου που ενέχει κάποια πιθανότητα να προκαλέσει μεγάλης ή μικρής κλίμακας καταστροφή στο ανθρωπογενές ή/και στο φυσικό περιβάλλον. Τέτοιοι κίνδυνοι είναι τα τροχαία, οι βιομηχανικές εκρήξεις και πυρκαγιές, η τυχαία διαφυγή τοξικών αερίων ή άλλων χημικών ουσιών και οι αστοχίες σε πυρηνικά εργοστάσια και η διαφυγή πυρηνικών ουσιών. Βεβαίως, εδώ, θα μπορούσαν να καταγραφούν και άλλες πολλές δραστηριότητες του ανθρώπου που άμεσα προκαλούν κινδύνους ή έμμεσα καταλήγουν στο να δημιουργούν κινδύνους, όπως η αποψίλωση των δασών, η ερημοποίηση κ.α.

Φυσικο-τεχνολογικοί κίνδυνοι (Na-Tech Hazards) είναι, σύμφωνα με ορισμένους ερευνητές, αυτοί οι κίνδυνοι που προκύπτουν, όταν, εξαιτίας κάποιου φυσικού φαινομένου (π.χ. μεγάλου σεισμού), διαφεύγουν **επικίνδυνα ή ραδιενεργά υλικά (Hazmat)**.

Βάσει αυτών μπορεί να διαχωριστεί η σεισμική επικινδυνότητα (seismic hazard) από τον σεισμικό κίνδυνο (seismic risk)

Σεισμική επικινδυνότητα (seismic hazard), είναι η πιθανότητα κάποια εδαφική παράμετρος να ξεπεράσει μια ορισμένη τιμή, σε ένα δεδομένο χρονικό διάστημα, σε μια θέση. Η εδαφική παράμετρος μπορεί να είναι η επιτάχυνση, η ταχύτητα, η μετατόπιση, ή ένταση κ.λπ.

Σεισμικός κίνδυνος (seismic risk), ορίζεται ως **Επικινδυνότητα (Hazard) * Τρωτότητα (Vulnerability)**. Ο σεισμικός κίνδυνος μπορεί να εκφραστεί σε οικονομικό κόστος, κόστος σε ανθρώπινες ζωές κ.λπ., ανά μονάδα του χρόνου.

Τρωτότητα (Vulnerability), ορίζεται ως ο βαθμός βλάβης (ή η πιθανότητα φθοράς) που προκαλεί στο κτίριο κάποιο σεισμικό φορτίο.

Η περιοχή ενδιαφέροντος απαρτίζεται, όχι μόνο από γοργά αναπτυσσόμενη οικιστική περιοχή, αλλά και από ένα παράκτιο κομμάτι εγκαταστάσεων δεξαμενών αποθήκευσης υγρών καυσίμων. Τα επιμέρους τμήματα των εγκαταστάσεων, όπως οι δεξαμενές, οι υπόγειοι, υποθαλάσσιοι και επίγειοι σωλήνες συχνά καταπονούνται από φυσικές, αλλά και από τεχνητές δονήσεις, οι οποίες προκαλούνται από τα βαρέα οχήματα κατά τη διάρκεια του ανεφοδιασμού, εργασίες που διενεργούνται στις εγκαταστάσεις κ.α..

Η σεισμική συμπεριφορά του επίγειου και υπόγειου συστήματος σωληνώσεων, των μεταλλικών δεξαμενών και των κτιριακών εγκαταστάσεων υπόκειται σε διαφορές πολλών απόψεων. Κάποιες είναι οι εξής:

- Οι οριζόντιες δυνάμεις αδρανείας, οι οποίες αποτελούν τον κύριο παράγοντα που επηρεάζει τον σχεδιασμό των δομών πάνω στο έδαφος, σε μεγάλο βαθμό αντιστάθηκαν από το περιβάλλον έδαφος (surrounding soil) στην περίπτωση των υπογείων αγωγών.
- Για κατασκευές πάνω στο έδαφος, το θεμέλιο, συνήθως, θεωρείται ότι ακολουθεί την κίνηση του εδάφους και, ως εκ τούτου, η σχετική απόκριση είναι η μετατόπιση σε σχέση με το θεμέλιο. Στην περίπτωση θαμμένων αγωγών, η σχετική κίνηση μεταξύ του σωλήνα και του περιβάλλοντος εδάφους είναι υπεύθυνη για την επαγωγή τάσεων στις αρθρώσεις.
- Η κίνηση του εδάφους θεωρείται να είναι συνδεδεμένη (coherent) για τις περισσότερες επίγειες δομές, ενώ για τους υπογείους αγωγούς θεωρείται ως ασυνάρτητη (incoherent) λόγω της διαφοράς φάσης μεταξύ των διαφόρων σταθμών και την αλλαγή στο σχήμα, λόγω της μεταβολής των ιδιοτήτων του εδάφους κατά μήκος του αγωγού.
- Η βλάβη της μιας επίγεια δομής, γενικά, περιορίζεται στην εν λόγω δομή και μόνο, αλλά η ζημιά σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία μέσα σε ένα δίκτυο αγωγών θα επηρεάσει και άλλα τμήματα του συστήματος.

Παρατηρήσεις πεδίου και διάφορες μελέτες δείχνουν ότι μεγάλες σεισμικές καταστροφές σε υπόγεια συστήματα αγωγών είναι οι εξής: (1) υπερβολικές αξονικές και καμπτικές τάσεις και παραμορφώσεις σε αγωγούς που δημιουργήθηκαν κυρίως από τη διαφορά φάσης και αλλαγή σχήματος κύματος μεταξύ διαφορετικών σημείων κατά μήκος του αγωγού (excessive axial and bending stresses and deformations in pipelines created mainly by the phase difference and change of wave shape between different points along the pipeline), (2) μεγάλες μετατοπίσεις που προκύπτουν από την κίνηση του ρήγματος κατά τη διάρκεια ενός σεισμού, αν ο αγωγός διασχίζει ένα κύριο ρήγμα, και (3) κατολισθήσεις και πλευστότητα/ εκτόπιση χώματος (buoyancy) που προκαλούνται από ρευστοποίηση εδάφους.

Ζημιές και διάσπαση των υπογείων αγωγών που προκλήθηκε από σεισμό μπορεί να έχουν σοβαρές επιπτώσεις στην πολιτική ζωή, δεδομένου ότι μπορεί να οδηγήσουν σε απώλεια των ζωτικών υπηρεσιών, των επικοινωνιών και των συστημάτων μεταφοράς. Κατά συνέπεια, η σεισμική συμπεριφορά αυτών των δομών έχει ερευνηθεί από πολλούς ερευνητές. Μια σειρά από ζητήματα που εμπλέκονται στη μελέτη της σεισμικής ανάλυσης και της συμπεριφοράς των υπογείων αγωγών. Αυτά περιλαμβάνουν: (1) μοντελοποίηση της σεισμικής διέγερσης και το σύστημα εδάφους-σωλήνα, (2) την αξιολόγηση των σεισμικών τάσεων στους αγωγούς, (3) τάσεις στις διασταυρώσεις και στις καμπές/γωνίες, (4) τάση στον αγωγό που οφείλονται στις κινήσεις ρήγματος και ρευστοποίηση εδάφους, (5) βλάβη του αγωγού σε σεισμούς, και (6) ευπάθειας των αγωγών σε σεισμικά φαινόμενα.

Όσον αφορά τις μεταλλικές δεξαμενές, οι οποίες, κατά κύριο λόγο, κατά τις τελευταίες δεκαετίες, είναι ουσιαστικά συγκολλημένες σε παγκόσμιο επίπεδο (Fabbrocino, Iervolino, και Manfredi, 2002) και σύμφωνα με τα ενοποιημένα πρότυπα σχεδιασμού και κατασκευής, εμφανίζουν ισχυρή δομικές ομοιότητες με τις δεξαμενές αποθήκευσης νερού, δεν προβλέπουν καμία ακριβή δυναμική ανάλυση και τα αποτελέσματα των σεισμικών δονήσεων αξιολογούνται μόνο από την άποψη της ισοδύναμης στατικής δράσης (equivalent static action), όπως ροπή ανατροπής (overturning moment) και συνολική διάτμηση βάσης (total base shear). Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια, μια πιο ολοκληρωμένη και προηγμένη κατευθυντήρια γραμμή για το σχεδιασμό αυτού του είδους των εγκαταστάσεων από δομικής άποψης αναφέρεται στον Ευρωκώδικα 8 (1998). Εδώ, πρέπει να τονισθεί ότι οι συγκολλήσεις είναι ευαίσθητες στη διάβρωση και μπορεί να οδηγηθούν σε ευρείες ρωγμές κατά τη διάρκεια εκδήλωσης σεισμού, ιδίως στις ζώνες ενώσεων του κελύφους στέγης και κελύφους πλάκας.

Σημαντικές δομικές πτυχές των υπάρχοντων χαλύβδινων δεξαμενών μπορούν να συνοψιστούν ως εξής: (i) η πλάκα της βάσης είναι επίπεδη ή σε σχήμα κωνικό και το κέλυφος αποτελείται από διαφορετικά κομμάτια χάλυβα περίπου 1,5 m ψηλά, το πάχος τους μειώνεται καθ' ύψος και σπάνια υπερβαίνει τα 2 cm στο κομμάτι του πυθμένα (αξία αναφοράς μεγάλων δεξαμενών), (ii) το πάχος κελύφους υπολογίζεται με τη χρήση απλουστευμένων τύπων (δηλαδή "μέθοδος one foot»), σύμφωνα με τις κατευθυντήριες γραμμές για το σχεδιασμό και εξαρτάται μόνο από τις διαστάσεις της δεξαμενής και την πυκνότητα του περιεχομένου, (iii) Οι στέγες με κυμαινόμενο (floating) ή σχήμα θόλου ή κωνικό και μπορεί να είναι αυτο-υποστηριζόμενη ή στηριζόμενη σε στήλη στην περίπτωση των μεγάλων διαμέτρων. Διεθνείς κατευθυντήριες γραμμές παρέχουν ελάχιστο πάχος πλάκας οροφής και γεωμετρικό υπολογισμό (π.χ. κλίση κώνου (cone inclination), ανάλογα με την διάμετρο των δεξαμενών).

Οι δεξαμενές συνήθως ταξινομούνται ως αγκυροβολημένες (anchored) και μη αγκυροβολημένες (unanchored), ανάλογα με τον τύπο του συστήματος συγκράτησης που παρέχεται στο έδαφος. Μη αγκυροβολημένες δεξαμενές είναι απλά ακουμπησμένες στο έδαφος ή σε χαλίκι, ενώ για τις μεγάλες δεξαμενές ή/και τις κακές συνθήκες εδάφους, ένα δαχτυλίδι από σκυρόδεμα μπορεί να είναι αποτελεσματικό (API Πρότυπο 620-650, 1998). Οι αγκυρωμένες δεξαμενές χαρακτηρίζονται από διαφορετικές μηχανικές συσκευές που περιορίζουν τις σχετικές μετατοπίσεις μεταξύ της βάσης της δομής και το θεμέλιο και γενικά συνιστώνται σε σεισμογενείς περιοχές, αλλά η αποτελεσματικότητά τους είναι ακόμα υπό έρευνα.

Μια άλλη κρίσιμη πτυχή για τη σεισμική συμπεριφορά των δεξαμενών αποθήκευσης είναι το θεμέλιο. Η ανάλυση των σεισμικών ζημιών επισημαίνουν τις επιπτώσεις σχετικά με τους μηχανισμούς κατάρρευσης του θεμελίου και τις επιδόσεις αντοχής της δομής (Eidinger, 2001).

Η δυναμική συμπεριφορά των ατμοσφαιρικών δεξαμενών που εκτίθενται σε σεισμούς χαρακτηρίζεται από δύο κυρίαρχους τρόπους δόνησης: ο πρώτος σχετίζεται με τη μάζα που άκαμπτα κινείται μαζί με τη δομή της δεξαμενής (παρορμητική μάζα), και ο δεύτερος αντιστοιχεί στο υγρό κυματισμού (μάζα συναγωγής) (Malhotra, Wenk, και Wieland, 2000).

Η κίνηση των υγρών κατά τη διάρκεια σεισμού παράγουν αρκετές ζημιές από φαινόμενα αλληλεπίδρασης ρευστού-κατασκευής και μπορεί να οδηγήσουν ως την κύρια αιτία της κατάρρευσης πλήρων ή σχεδόν πλήρων δεξαμενών (Ballantyne και Crouse, 1997).

Η πιο συνηθισμένη βλάβη στο κέλυφος είναι το «Elephant foot buckling» (EFB). Για μη αγκυροβολημένες δεξαμενές και $H/R < 0.8$, το EFB δεν είναι μεγάλη δοκιμασία, αλλά η πλάκα βάσης ή η σύνδεση του κελύφους μπορεί να εξασθενίσουν προκαλώντας διαρροή (Ballantyne και Crouse, 1997).

Η πιθανότητα φθοράς, όμως δεν καλύπτει μόνο το γεγονός μια υγιείς κατασκευή να πληγεί από έναν καταστροφικό σεισμό μεγάλης κλίμακας, αλλά περικλείει και τα μικρά καθημερινά γεγονότα, είτε ανθρωπογενή είτε φυσικά. Αυτά τα συνεχόμενα γεγονότα, μπορούν να εξηγηθούν και να αναλυθούν από έναν γενικό όρο, τον **Εδαφικό Θόρυβο**. Με τον όρο αυτόν εννοούμε την αέναη και μη αντιληπτή στον άνθρωπο κίνηση της επιφάνειας της Γης εξαιτίας της επίδρασης διαφόρων παραγόντων. Οι παράγοντες αυτοί μπορεί να προέρχονται από το εσωτερικό ή την επιφάνεια της Γης (παλίρροιας, ασθενείς κινήσεις γεωλογικών σχηματισμών, μακρινές ασθενείς σεισμικές δονήσεις, θαλάσσια κύματα), από την ατμόσφαιρα (βροχή, αέρας, μεταβολή θερμοκρασίας και πίεσης) και από ανθρωπογενείς διαδικασίες (βιομηχανικές εγκαταστάσεις, οχήματα σε κίνηση, βάδιση, μηχανές). Όλοι αυτοί οι παράγοντες δημιουργούν την αέναη κίνηση της επιφάνειας της Γης σε διάφορες συχνότητες και πλάτη.

Ένα από τα κύρια ζητήματα σε ότι αφορά τη χρησιμότητα του εδαφικού θορύβου για την εκτίμηση των τοπικών εδαφικών συνθηκών αφορά τη φύση του εδαφικού θορύβου. Αρχικά ο Kanai (1961) υπέθεσε ότι ο εδαφικός θόρυβος αποτελείται κυρίως από κάθετα προσπίπτοντα εγκάρσια κύματα και γι αυτό μοιάζει πολύ με το σήμα των σεισμών. Αυτή η αμφιλεγόμενη υπόθεση απορρίφθηκε από πολλούς ερευνητές (Aki, 1957, Akamatsu, 1961, Nogoroshi και Igarashi, 1970, 1971, Udawadia και Trifunac, 1973, Irikura και Kawanaka, 1980, Horike, 1985, Matsushima και Okada, 1990, Milana et al., 1996, Chouet et al., 1998), οι οποίοι απέδειξαν το μεγάλο βαθμό συμμετοχής των επιφανειακών κυμάτων στον εδαφικό θόρυβο και πρότειναν διάφορες μεθόδους (μεταξύ αυτών τη μέθοδο του χωρικού συντελεστή αυτοσυσχέτισης, τη μέθοδο κυματαρίθμου – συχνότητας) για την επεξεργασία δεδομένων εδαφικού θορύβου, βασιζόμενοι στην υπόθεση ότι ο εδαφικός θόρυβος αποτελείται κατά κύριο λόγο από επιφανειακά κύματα. Η επιτυχία των μεθόδων αυτών στην εύρεση της κατανομής της ταχύτητας των εγκάρσιων κυμάτων στο υπέδαφος είναι μια έμμεση απόδειξη ότι ο εδαφικός θόρυβος αποτελείται κυρίως από επιφανειακά κύματα.

Παρόλα τα παραπάνω αποτελέσματα τα τελευταία χρόνια είναι σχετικά λίγες οι μελέτες που έχουν ασχοληθεί με τη φύση του εδαφικού θορύβου. Μακροχρόνιες παρατηρήσεις του εδαφικού θορύβου πραγματοποιήθηκαν σε μερικούς παράκτιους σταθμούς καταγραφής στην Ιαπωνία, στον κόλπο του Tokyo (Kamura, 1997), στον κόλπο του Kobe (Seo et al., 1996, Seo, 1997), στον κόλπο του Fukui (Seo, 1998), για τη διερεύνηση της σταθερότητας των πηγών και των χαρακτηριστικών του εδαφικού θορύβου μικρής και μεγάλης περιόδου. Τα συμπεράσματα αυτών των παρατηρήσεων σε διαφορετικές θέσεις είναι παρόμοια και μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- Για το κομμάτι του εδαφικού θορύβου σε χαμηλές συχνότητες (κάτω από 0.3 έως 0.5 Hz), ο εδαφικός θόρυβος προκαλείται κυρίως από ωκεάνια κύματα σε μεγάλες αποστάσεις. Το αντίστοιχο κομμάτι του φάσματος του εδαφικού θορύβου είναι σχετικά σταθερό για αρκετές ώρες, και μπορεί να συσχετιστεί με μεγάλες μετεωρολογικές μεταβολές στους ωκεανούς.

- Στις μεσαίες συχνότητες (μεταξύ 0.3-0.5 και 1 Hz περίπου) ο εδαφικός θόρυβος προκαλείται από κοντινά θαλάσσια κύματα και τον άνεμο και η χρονική σταθερότητα του φάσματος είναι σημαντικά μικρότερη.

- Πάνω από 1 Hz ο εδαφικός θόρυβος προκαλείται κυρίως από την ανθρώπινη δραστηριότητα.

Ο διαχωρισμός σε χαμηλές και υψηλές συχνότητες στο 1 Hz αντικατοπτρίζει τη διάκριση του εδαφικού θορύβου σε «μικροσεισμικότητα» με φυσική προέλευση και «μικροθόρυβο» που προέρχεται από τον άνθρωπο. Κατά τον Seo (1997) αυτό το όριο μπορεί να μετατοπιστεί σε χαμηλότερες συχνότητες σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από χαμηλή θεμελιώδη συχνότητα και υψηλή διαφορά εμπέδησης μεταξύ των σχηματισμών. Σε αυτές τις περιπτώσεις ο «μικροθόρυβος» μπορεί να υπερκεράσει τους «μικροσεισμούς», ακόμα και σε ενδιάμεσες συχνότητες (μεταξύ 0.3 και 0.5 Hz). Το πιο τυπικό παράδειγμα είναι η πόλη του Μεξικού, ενώ σε παρόμοια αποτελέσματα κατέληξαν και οι Lebrun et al. (2001) για την πόλη της Grenoble στη Γαλλία, όπου εξαιτίας της ύπαρξης κοιλάδας πληρωμένης με ιζήματα σε μεγάλο πάχος υπάρχει αρκετή ενέργεια που οφείλεται σε ανθρωπογενή θόρυβο σε συχνότητες κάτω του 1 Hz.

Εξαιτίας αυτής της ασάφειας στον καθορισμό της συχνότητας που θα ορίζει τη διαφορά μεταξύ φυσικού και ανθρωπογενούς θορύβου, ο Seo (1996, 1997) πρότεινε έναν εύκολο τρόπο για το διαχωρισμό τους. Πραγματοποιώντας συνεχόμενες μετρήσεις, αν παρατηρηθεί διαφορά στο πλάτος της καταγραφής μεταξύ μέρας και νύχτας κατά ένα λόγο 3 με 4, τότε ο εδαφικός θόρυβος αποτελείται από «μικροθόρυβο», δηλαδή είναι κυρίως ανθρωπογενής.

Παρότι οι παραπάνω μελέτες καταλήγουν σε κάποια συμπεράσματα σχετικά με τη φύση του εδαφικού θορύβου, δεν αποκαλύπτουν καμία πληροφορία σχετικά με τη σύνθεση του. Τα συμπεράσματα σχετικά με την ωκεάνια προέλευση του εδαφικού θορύβου έχουν επιβεβαιωθεί από τους Friedrich et al. (1998), που διέκριναν σταθερά κύματα Love και Rayleigh σε πολύ χαμηλές συχνότητες (μεταξύ 0.05 και 0.15 Hz) σε δεδομένα που συλλέχτηκαν από τη διάταξη Grafenberg στη Γερμανία, και τοποθέτησαν τις πηγές στη Μεσόγειο Θάλασσα, στον Ατλαντικό και τον Αρκτικό Ωκεανό.

Περαιτέρω πληροφορίες παρουσιάζονται στα αποτελέσματα των Chouet et al. (1998), οι οποίοι ανέλυσαν δεδομένα ηφαιστειακού θορύβου από το ηφαίστειο Stromboli στην Ιταλία, και βρήκαν πολύ μεγάλο ποσοστό συμμετοχής των επιφανειακών κυμάτων στον εδαφικό θόρυβο, με συμμετοχή 70% κυμάτων Rayleigh και 30% κυμάτων Love. Καθώς ο ηφαιστειακός θόρυβος προέρχεται από μεγαλύτερα βάθη σε σχέση με τον εδαφικό, είναι εύλογο να υποθεθεί ότι ο τυπικός εδαφικός θόρυβος αποτελείται από επιφανειακά κύματα σε μεγαλύτερο ακόμα ποσοστό. Τα αποτελέσματα είναι σε συμφωνία με αυτά που προέκυψαν από την φασματική ανάλυση εδαφικού θορύβου με χρήση ειδικών διατάξεων σεισμομέτρων από τους Milana et al. (1996) στην Κεντρική Ιταλία. Οι ερευνητές αυτοί απέδειξαν ότι τα επιφανειακά κύματα κυριαρχούν στον εδαφικό θόρυβο μεταξύ των συχνοτήτων 2 και 10 Hz. Είναι άξιο αναφοράς ότι η σύγκριση μεταξύ πραγματικών και συνθετικών μετρήσεων εδαφικού θορύβου στην κοιλάδα Garner στην Καλιφόρνια των Η.Π.Α. υποδεικνύει έντονα ότι ο εδαφικός θόρυβος περιέχει και μεγάλο ποσοστό κυμάτων χώρου.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το ποσοστό συμμετοχής των θεμελιωδών κυμάτων Rayleigh σε χαμηλές συχνότητες (κάτω από 1Hz) είναι κυρίαρχο στη σύνθεση του εδαφικού θορύβου, ενώ σε υψηλότερες συχνότητες ο εδαφικός θόρυβος αποτελείται από επιφανειακά και κύματα χώρου (Douze, 1964, 1967, Toksoz και Lacoss, 1968, Li et al., 1984, Horike, 1985, Yamanaka et al., 1994). Το ποσοστό των κυμάτων Love σε συχνότητες μεγαλύτερες του 1 Hz φαίνεται ότι είναι μεγάλο (Ohmachi και Umezono, 1998, Chouet et al., 1998, Arai και Tokimatsu, 1998, 2000, Yamamoto 2000, Cornou et al., 2003a,b, Okada, 2003, Kohler et al., 2004).

Ένα άλλο σημαντικό ζήτημα είναι η κατανομή της ενέργειας των κυμάτων Rayleigh σε αρμονικές μεγαλύτερες της θεμελιώδους, όπου υπάρχει δυσκολία προσδιορισμού του ποσοστού εξαιτίας της ανομοιογένειας των εδαφικών σχηματισμών. Ο Tokimatsu (1997) ανέλυσε συνθετικές καταγραφές για μοντέλα μονοδιάστατης δομής, και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι ανώτερες αρμονικές των Rayleigh κυμάτων υπάρχουν στον εδαφικό θόρυβο και διεγείρονται ανάλογα με τη δομή των ταχυτήτων των εγκάρσιων κυμάτων. Από τα παραπάνω, είναι προφανές ότι δεν υπάρχουν σαφή και καθορισμένα όρια συμμετοχής των διαφόρων κυμάτων στη σύνθεση του εδαφικού θορύβου, και το ποσοστό του κάθε κύματος εξαρτάται κάθε φορά από πολλές παραμέτρους, γι' αυτό και απαιτούνται εκτενέστερες ερευνητικές προσπάθειες στο αντικείμενο αυτό.

Οι μέθοδοι ανάλυσης του εδαφικού θορύβου έχουν βρει ευρεία εφαρμογή τα τελευταία χρόνια σε μικροζωνικές μελέτες και γεωτεχνικές εφαρμογές, παρά το γεγονός ότι ακόμα δεν έχει αποσαφηνιστεί το θεωρητικό υπόβαθρο των μεθόδων, η συμμετοχή των διαφόρων κυμάτων στη σύνθεση του εδαφικού θορύβου, κλπ. Με τη χρήση αριθμητικών προσομοιώσεων και τη παραγωγή συνθετικών καταγραφών εδαφικού θορύβου διάφοροι μελετητές έχουν καταλήξει στο συμπέρασμα ότι η θεμελιώδης συχνότητα των εδαφικών σχηματισμών μπορεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια, όχι όμως και το πλάτος ενίσχυσης (Field και Jacob, 1993, Lachet και Bard, 1994, Lermo και Chavez-Garcia, 1994a, Dravinski et al., 1996, Wakamatsu και Yasui, 1996, Al Yuncha και Luzon, 2000, Fah et al., 2001, Maresca et al., 2003, Bonnefoy-Claudet, 2004, Cornou et al., 2004, Guillier et al., 2006, Bonnefoy-Claudet et al., 2006). Στο ίδιο συμπέρασμα έχουν καταλήξει και έρευνες που πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση δεδομένων εδαφικού θορύβου και ανάλυση τους με τη μέθοδο του φασματικού λόγου της οριζόντιας προς κατακόρυφη συνιστώσα μονού σταθμού, και σύγκριση τους με τον κλασικό φασματικό λόγο δεδομένων ασθενούς σεισμικής κίνησης (Chavez-Garcia et al., 1990, Field et al., 1990, Duval et al., 1994, Teves-Costa et al., 1996, Bour et al., 1998, Riepl et al., 1998, Bindi et al., 2000, Semblat et al., 2000, Duval et al., 2001, Nguyen et al., 2004). Κάποιες μελέτες δείχνουν καλή συμφωνία του πλάτους ενίσχυσης των εδαφικών σχηματισμών που προκύπτει από τη σύγκριση των δύο παραπάνω μεθόδων (Lermo και Chavez-Garcia, 1994b, Seekins et al., 1996, Mucciarelli, 1998, Chavez-Garcia et al., 1999, Zaslavsky et al., 2000, Horike et al., 2001, Rodriguez και Midorikawa, 2002). Το γενικό συμπέρασμα που προκύπτει από όλους τους παραπάνω μελετητές είναι πως σε απλές δομές που δεν παρουσιάζουν μεγάλη ετερογένεια και φαινόμενα δύο ή τριών διαστάσεων, η θεμελιώδης συχνότητα των εδαφικών σχηματισμών μπορεί να προσδιοριστεί μέσω της μεθόδου του φασματικού λόγου της οριζόντιας προς κατακόρυφη συνιστώσα σε ένα σταθμό, αλλά το πλάτος ενίσχυσης που έμμεσα προκύπτει από το λόγο αυτό ενδέχεται να είναι υποεκτιμημένο σε σχέση με το πραγματικό, που προκύπτει από τη μέθοδο του κλασσικού φασματικού λόγου.

Η χρήση των ειδικών διατάξεων σεισμομέτρων είναι σε θέση να μας παρέχει την κατανομή των εγκάρσιων κυμάτων σε σχέση με το βάθος σε μια συγκεκριμένη θέση με αρκετή αξιοπιστία (Wathelet, 2005). Το πλεονέκτημα της χρήσης αυτής της μεθόδου είναι ότι τα δεδομένα μπορούν να επεξεργαστούν και με την προηγούμενη μέθοδο, αλλά και με την υβριδική μέθοδο, όπου γίνεται ταυτόχρονη αντιστροφή της καμπύλης διασποράς που έχει προκύψει, και της καμπύλης του φασματικού λόγου της οριζόντιας προς την κατακόρυφη συνιστώσα του κεντρικού σταθμού των ειδικών διατάξεων σεισμομέτρων (Tokimatsu et al., 1998, Fah et al., 2001, Arai και Tokimatsu, 2004).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Γεωλογική δομή περιοχής ενδιαφέροντος



Η περιοχή μελέτης εντοπίζεται στην περιοχή της Δυτικής Κρήτης, Βορειοανατολικά της πόλης των Χανίων στην περιοχή του Αγ. Ονουφρίου του Ακρωτηρίου. Η γεωλογική δομή της Κρήτης συνδέεται άμεσα με τη συνολική γεωλογική δομή της Ελλάδας, η οποία χωρίζεται σε διάφορες γεωτεκτονικές ζώνες με γενική διεύθυνση στον ηπειρωτικό χώρο της ΒΔ-ΝΑ.

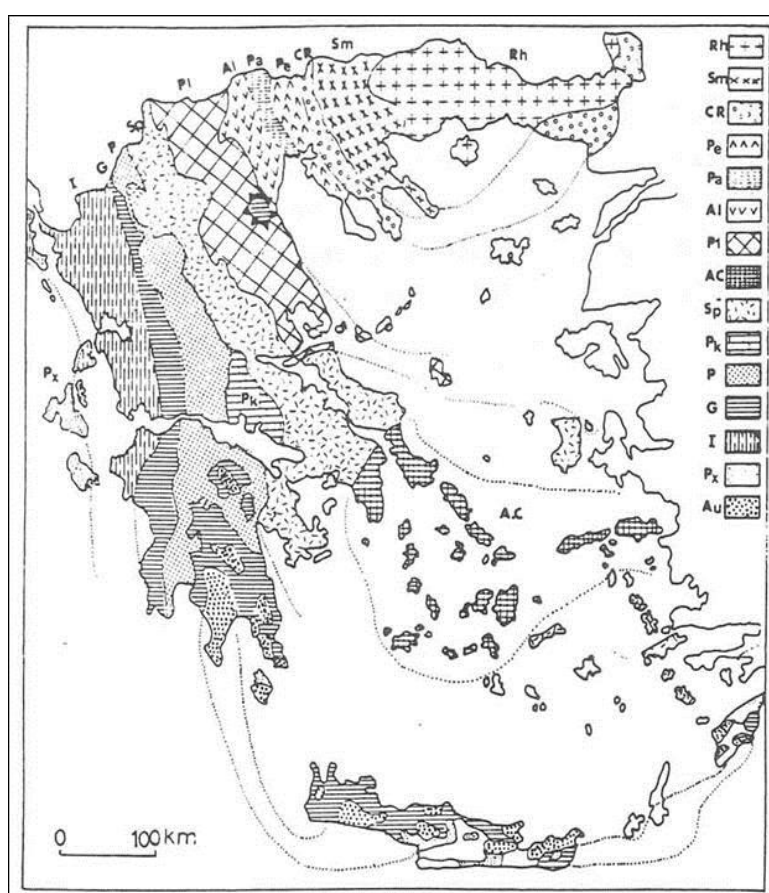
Κάθε ζώνη, χαρακτηρίζεται από ορισμένη και χαρτογραφίσιμη στρωματογραφική και λιθολογική διαδοχή των πετρωμάτων της, όπως αυτά προέκυψαν από την επαλληλία των τεκτονικών γεγονότων που οδήγησαν στη δημιουργία του ορογενούς.

Στον ευρύτερο Ελλαδικό χώρο, οι κύριες γεωτεκτονικές ζώνες των οροσειρών με διεύθυνση από ΒΔ προς ΝΑ είναι:

1. **Μάζα Ροδόπης.** Εμφανίζεται στην Αν. Μακεδονία, Θράκη και στη Θάσο. Αποτελείται από κρυσταλλοσχιστώδη και πυριγενή πετρώματα.
2. **Σερβομακεδονική Μάζα.** Εμφανίζεται Δυτικά του Στρυμόνα από τα σύνορα μέχρι και τη Χαλκιδική. Αποτελείται, κυρίως, από κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα.
3. **Περιοδοπική Ζώνη.** Εκτείνεται στη δυτική πλευρά της Σερβομακεδονικής μάζας με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ.
4. **Ζώνη Αξιού.** Αποτελείται από 3 υποζώνες, τις Παιονίας, Πάϊκου και Αλμωπίας. Εμφανίζεται στην κεντρική Μακεδονία, χαρακτηρίζεται από τις μεγάλες οφιολιθικές μάζες που απαντώνται σε αυτές.
5. **Πελαγονική Ζώνη.** Εμφανίζεται σε όλη την Ελλάδα. Αποτελείται από κρυσταλλοσχιστώδες υπόβαθρο, γνευσιωμένους γρανίτες και ανθρακικά καλύμματα.
6. **Αττικοκυκλαδική Ζώνη.** Κυρίως στα νησιά των Κυκλάδων και σ' ένα τμήμα της Αττικής και της Ν. Εύβοιας.

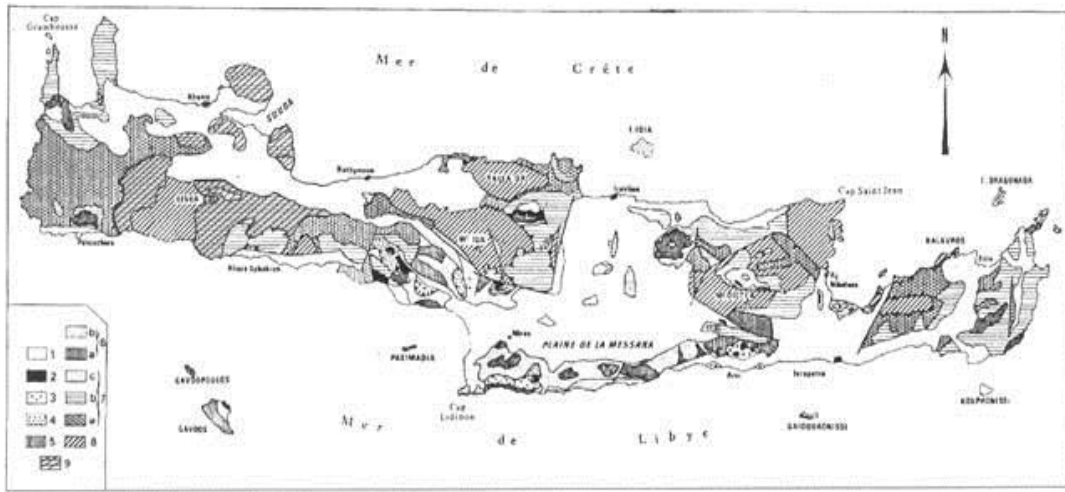
7. Υποπελαγονική Ζώνη (Ζώνη Αν. Ελλάδας). Εμφανίζεται στη δυτική πλευρά της Πελαγονική ζώνης. Χαρακτηρίζεται από τις μεγάλες οφιολιθικές μάζες που απαντώνται σ' αυτή.
8. Ζώνη Παρνασσού- Γκιώνας. Εμφανίζεται στην κεντρική Στερεά Ελλάδα και αποτελείται από ασβεστόλιθους και δολομίτες.
9. Ζώνη Ωλονού-Πίνδου Εμφανίζεται στην Ήπειρο, στην κεντρική, στη δυτική και βορειανατολική Ελλάδα.
10. Ζώνη Γαβρόβου-Τρίπολης.
11. Αδριατικοϊόνιος Ζώνη.
12. Ζώνη Παξών ή Προαπούλια.

Εκτός από τις παραπάνω 12 ζώνες σα διακριτές γεωτεκτονικές μονάδες αναφέρονται, επίσης, η ενότητα «**Ταλέα Όρη – Πλακώδεις Ασβεστόλιθοι**», που μάλλον ανήκει στην Αδριατικοϊόνιο ζώνη και η ενότητα **Βοιωτία**, που πιθανόν να είναι τμήμα της Υποπελαγονική μάζας. Οι δύο αυτές γεωτεκτονικές μονάδες έχουν προταθεί από ορισμένους επιστήμονες ως ανεξάρτητες ζώνες άλλα υπάρχει, όμως, αμφισβήτηση για το χαρακτηρισμό αυτό και για αυτό το λόγο χαρακτηρίζονται απλά ως «γεωλογικές ενότητες».



Γεωτεκτονικό σχήμα των Ελληνίδων ζωνών. Rh: Μάζα Ροδόπης, SM: Σερβομακεδονική μάζα, CR: Περιροδοπική ζώνη, (Pe: Ζώνη Παιονίας, Pa: Ζώνη Παϊκου, AI: Ζώνη Αλμωπίας) = Ζώνη Αζίου, PI: Πελαγονική ζώνη, Ac: Αττικο-Κυκλαδική ζώνη, Sp: Υποπελαγονική ζώνη, Pk: Ζώνη Παρνασσού - Γκιώνας, P: Ζώνη Πίνδου, G: Ζώνη Γαβρόβου-Τρίπολης, I: Ιόνιος ζώνη, Px: Ζώνη Παξών ή Προαπούλια, Au: Ενότητα «Ταλέα όρη - πλακώδεις ασβεστόλιθοι» πιθανόν της Ιονίου ζώνης (Μουντράκης, 1985).

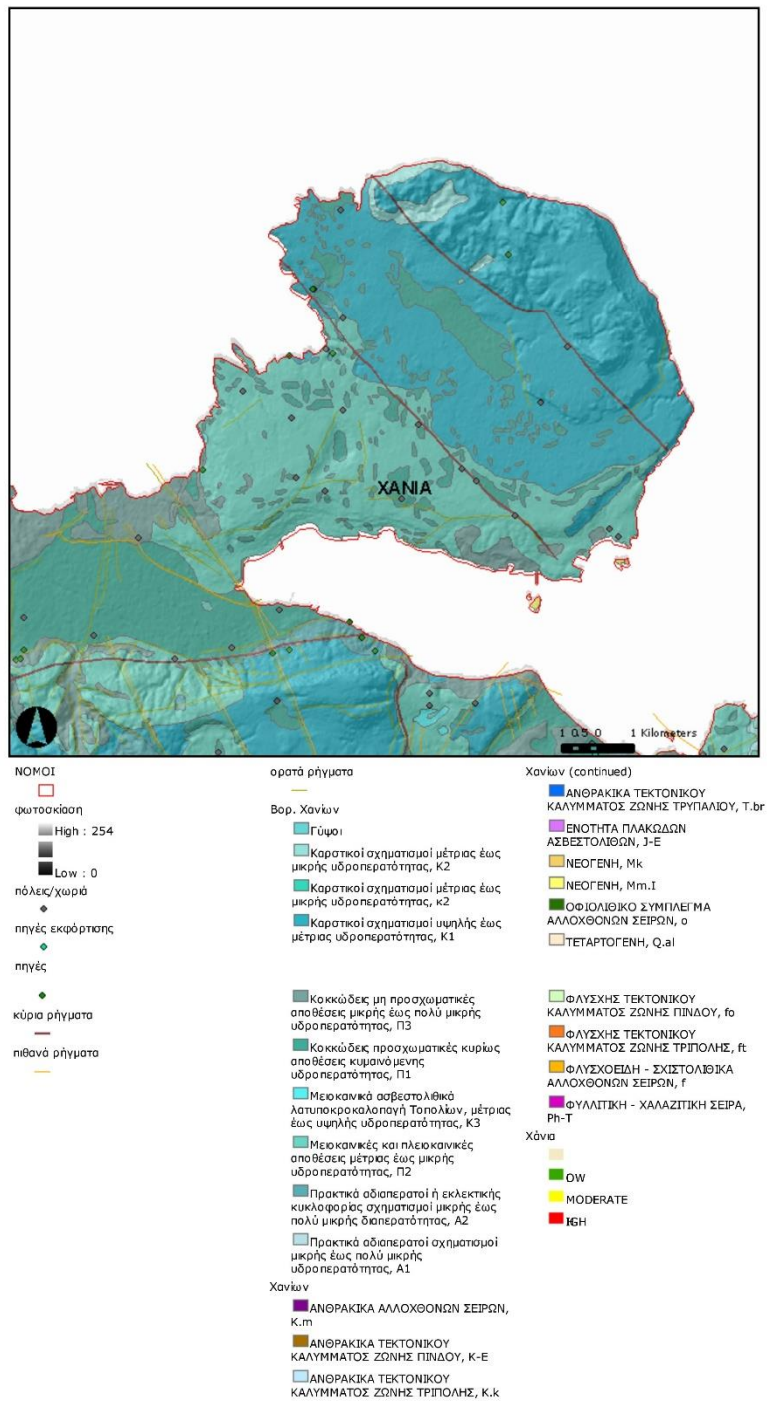
Η Κρήτη έχει μια πολύπλοκη γεωλογική δομή και έχουν διατυπωθεί διάφορες απόψεις σχετικά με τη δομή της, αυτό οφείλεται στη γεωτεκτονική θέση που κατέχει σε σχέση με τις 2 συγκλίνουσες λιθοσφαιρικές πλάκες της Ευρασιατικής και της Αφρικανικής.



Το αυτόχθονο ή σχετικά αυτόχθονο σύστημα της Κρήτης αποτελεί η ακολουθία «**Ταλέα όρη – Πλακώδεις Ασβεστόλιθοι**». Η ενότητα αυτή έχει ηλικία από το Πέρμιο μέχρι το Ηώκαινο και είναι ημιμεταμορφωμένη και πιθανώς ανήκει στην Αδριατικοϊόνιο ζώνη. Αποτελείται, κυρίως, από κλασικά ιζήματα χωρίς ηφαιστειακά πετρώματα στη βάση, που εξελίσσονται σε τυπικούς πλακώδεις ασβεστόλιθους, που περιέχονται σε σημαντικό βαθμό κερατολιτικούς κονδύλους και πυριτικές ενστρώσεις. Εμφανίζονται, επίσης, μεγάλες μάζες άστρωτων (μετα) – ασβεστολιθικών, δολομιτών, ασβεστολιθικών κροκαλοπαγών και φυλλιτικών – χαλαζιακών πετρωμάτων. Αποκαλύπτεται σε πολλές περιοχές της Κρήτης υπό μορφή τεκτονικού παραθύρου.

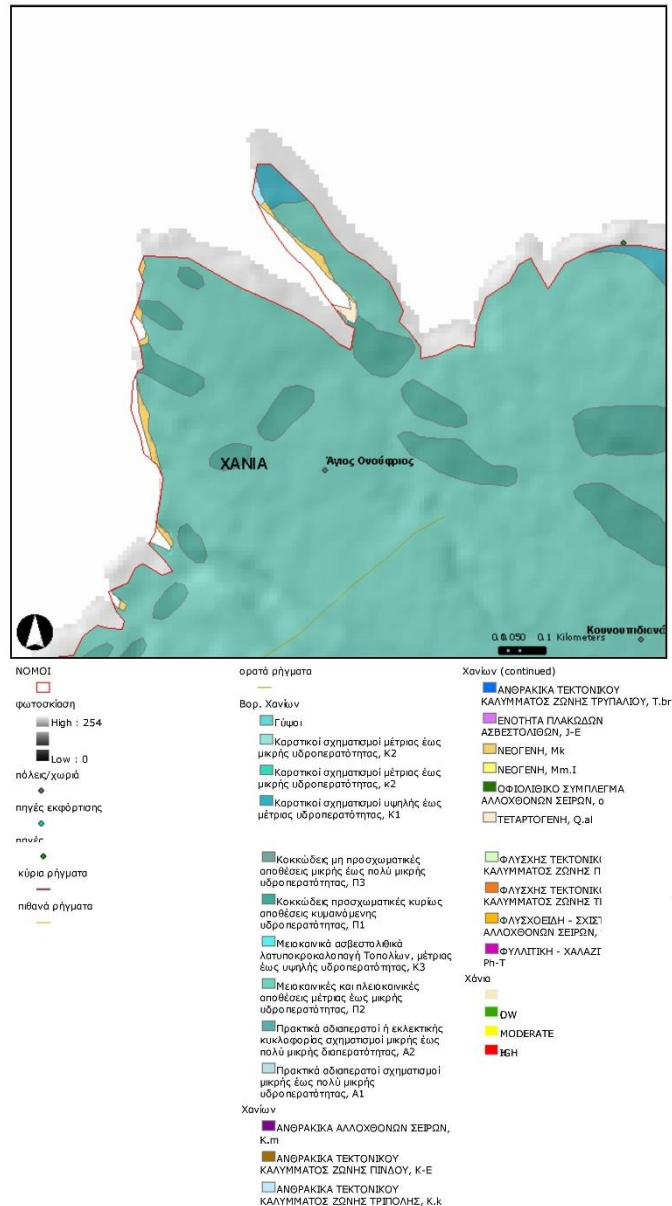


Map



Στην ευρύτερη περιοχή του Ακρωτηρίου εντοπίζονται κοκκώδης προσχωματικές και μη προσχωματικές αποθέσεις, μειοκαινικά ασβεστολιθικά λατυποκροκαλοπαγή Τοπολίων, μειοκαινικές και πλειοκαινικές αποθέσεις, γύψοι και καρστικοί σχηματισμοί, όπως μπορούμε να διακρίνουμε στο γεωλογικό χάρτη που έχει παρατεθεί. Επίσης, μπορούμε να διακρίνουμε δύο κύρια ρήγματα με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ τα οποία δε διαπερνούν την περιοχή μελέτης.

Map



Στο χάρτη της περιοχής έρευνας μπορούμε να διακρίνουμε καρστικούς σχηματισμούς και μειοκαινικές και πλειοκαινικές αποθέσεις μέτριας έως μικρής διαπερατότητας. Όπως μπορούμε να διαπιστώσουμε από τις φωτογραφίες, η περιοχή στην οποία λήφθηκαν οι μετρήσεις αποτελείται από πλακώδεις ασβεστόλιθους, ερυθρογή και θαλάσσιες αποθέσεις. Τέλος, κάποιες από τις θέσεις των μετρήσεων αποτελούνταν από φερτά υλικά, λόγω εκτροφής αιγοπροβάτων και καλλιέργειας αμπέλων.

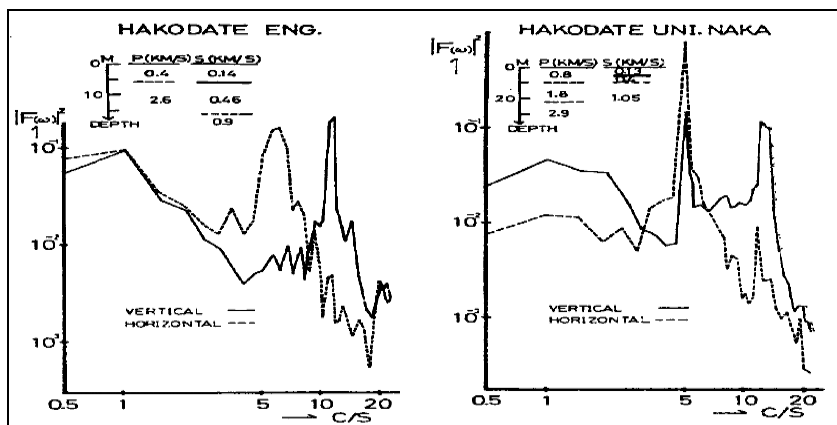


ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

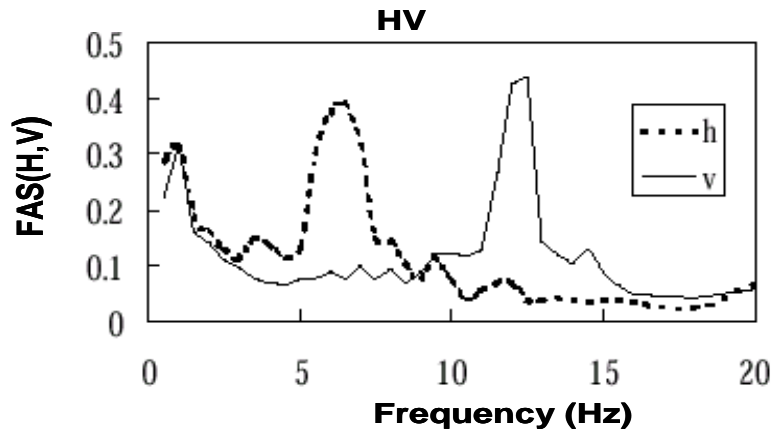
Μέθοδος Φασματικού Λόγου Οριζόντιας προς Κατακόρυφη Συνιστώσα

3.1. Εισαγωγή - Ιστορική προσέγγιση της μεθόδου εδαφικού θορύβου μονού σταθμού

Η θεμελιώδης ιδέα της χρήσης του λόγου της οριζόντιας προς κατακόρυφη συνιστώσα του εδαφικού θορύβου (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) χρησιμοποιώντας έναν σταθμό καταγραφής προτάθηκε από τους Nogoshi και Igarashi (1971). Με την εφαρμογή της καθίσταται δυνατός σε πολλές περιπτώσεις ο ποσοτικός διαχωρισμός των εδαφών σε βραχώδη ή χαλαρά και ο πειραματικός προσδιορισμός της θεμελιώδους συχνότητας ενίσχυσης των σεισμικών κυμάτων σε σχέση με την κίνηση στο βραχώδες υπόβαθρο. Η ερμηνεία των Nogoshi και Igarashi εδράζεται στην υπόθεση ότι το κυματικό πεδίο του εδαφικού θορύβου αποτελείται κύρια από επιφανειακά κύματα. Συγκρίνοντας την οριζόντια και κατακόρυφη συνιστώσα των κυμάτων Rayleigh και τις αντίστοιχες συνιστώσες των καταγραφών του εδαφικού θορύβου, διαπίστωσαν ότι η κατακόρυφη συνιστώσα του εδαφικού θορύβου εξαφανίζεται στην περιοχή γειτονίας της θεμελιώδους συχνότητας των S-κυμάτων (Bard, 1999). Σύμφωνα πάντα με την ερμηνεία των Nogoshi και Igarashi ο φασματικός λόγος της οριζόντιας προς την κατακόρυφη συνιστώσα με τη χρήση εδαφικού θορύβου συσχετίζεται με την ελλειπτικότητα των Rayleigh κυμάτων και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της θεμελιώδους συχνότητας ενίσχυσης των χαλαρών εδαφών. Για να αποδείξουν την παραπάνω υπόθεση τους πραγματοποίησαν μετρήσεις εδαφικού θορύβου στην πόλη Hakodate της Ιαπωνίας, συγκρίνοντας τα φασματικά χαρακτηριστικά της οριζόντιας και της κατακόρυφης συνιστώσας. Στην Σχήμα (1) παρουσιάζονται δύο παραδείγματα του φάσματος ενέργειας της οριζόντιας προς την κατακόρυφη συνιστώσα του εδαφικού θορύβου σε δύο διαφορετικές θέσεις μέτρησης στην πόλη Hakodate (Nogoshi και Igarashi, 1971). Το φάσμα ενέργειας στη θέση του Hakodate Uni.Naka μεταξύ της οριζόντιας και της κατακόρυφης συνιστώσας είναι παρόμοιο, ενώ στη θέση Hakodate ENG είναι αρκετά διαφορετικό. Το φάσμα Fourier της οριζόντιας και της κατακόρυφης συνιστώσας στην θέση Hakodate ENG σε γραμμική κλίμακα παρουσιάζεται στην Σχήμα (2).



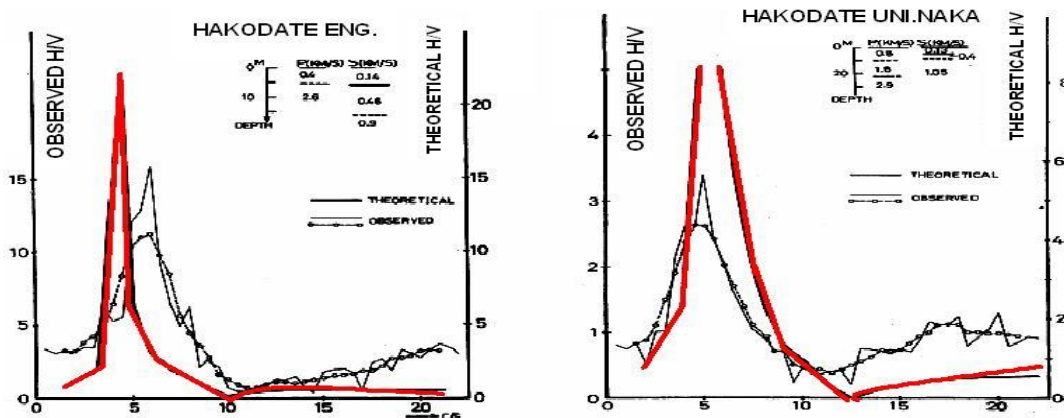
Σχήμα 1: Πυκνότητα φάσματος ενέργειας $|F(\omega)|^2$ της οριζόντιας συνιστώσας (στικτή γραμμή) και της κατακόρυφης συνιστώσας (συνεχής γραμμή) εδαφικού θορύβου σε δύο θέσεις, Hakodate ENG (αριστερά) και Hakodate Uni.Naka (δεξιά). Το μοντέλο ταχύτητας των δύο θέσεων παρουσιάζεται στο άνω μέρος του κάθε σχήματος (Nogoshi και Igarashi 1971, από Nakamura 2000).



Σχήμα 2: Φάσμα Fourier της οριζόντιας (στικτή γραμμή) και κατακόρυφης συνιστώσας (συνεχής γραμμή) στη θέση Hakodate ENG (Nogoshi και Igarashi 1971, από Nakamura 2000).

Η μελέτη των Nogoshi και Igarashi (1971) όπως παρουσιάστηκε παραπάνω βασίζεται στην υπόθεση ότι ο εδαφικός θόρυβος αποτελείται από επιφανειακά κύματα. Χρησιμοποιώντας αυτή την υπόθεση πολλοί ερευνητές κατέληξαν σε παρόμοια συμπεράσματα, που συνοψίζονται από τον Bard (1999) ως εξής:

- 1) Το κυματικό πεδίο του εδαφικού θορύβου αποτελείται κατά κύριο λόγο από επιφανειακά κύματα Rayleigh.
- 2) Ο λόγος της οριζόντιας προς κατακόρυφη συνιστώσα του εδαφικού θορύβου σχετίζεται άμεσα με την ελλειπτικότητα των Rayleigh κυμάτων εξαιτίας της κυριαρχίας τους στην οριζόντια συνιστώσα (Σχήμα 3).
- 3) Η ελλειπτικότητα των Rayleigh κυμάτων εξαρτάται από τη συχνότητα, και παρουσιάζει ένα οξύ μέγιστο στην περιοχή της θεμελιώδους συχνότητας εδαφικής ενίσχυσης των S κυμάτων για σχηματισμούς χαλαρών εδαφών που έχουν σημαντική διαφορά εμπέδησης με το υπόβαθρο. Το οξύ αυτό μέγιστο οφείλεται στην απουσία της κατακόρυφης συνιστώσας, η οποία αντιστοιχεί στην αλλαγή περιστροφής του θεμελιώδους Rayleigh κύματος από αριστερόστροφο σε δεξιόστροφο.
- 4) Το όριο του λόγου ταχυτήτων των S-κυμάτων μεταξύ του υποβάθρου και των χαλαρών σχηματισμών για το οποίο το φάσμα του λόγου οριζόντιας προς κατακόρυφη συνιστώσα παρουσιάζει ίδιο μέγιστο με την καμπύλη ελλειπτικότητας των Rayleigh κυμάτων είναι ανάμεσα στο 2.5 και 3.



Σχήμα 3: Σχέση μεταξύ του παρατηρούμενου λόγου οριζόντιας προς κατακόρυφη συνιστώσα εδαφικού θορύβου και της ελλειπτικότητας των κυμάτων Rayleigh για τις ίδιες θέσεις με το Σχήμα 1. Η συνεχόμενη μαύρη και κόκκινη γραμμή απεικονίζει τον πειραματικό και θεωρητικό φασματικό λόγο της οριζόντιας προς κατακόρυφη συνιστώσα των κυμάτων Rayleigh, αντίστοιχα, ενώ η στικτή μαύρη γραμμή τον αντίστοιχο

φασματικό λόγο του εδαφικού θορύβου στην ίδια θέση (Nogoshi και Igarashi, 1971, από Nakamura, 2000, τροποποιημένο).

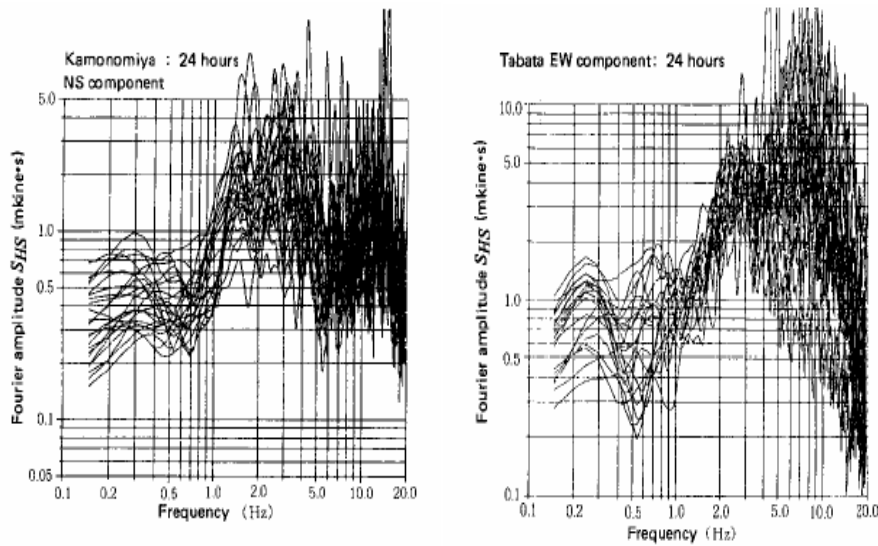
Εκτός από τους Nogoshi και Igarashi, πολύ άλλοι μελετητές (Field και Jacobs, 1993, 1995, Lachet και Bard, 1994, Ansary et al. 1995, Horike, 1996, Tokimatsu et al. 1996, Bard, 1999) έχουν προτείνει ότι η θεμελιώδης συχνότητα που προκύπτει από τον λόγο της οριζόντιας προς την κατακόρυφη συνιστώσα ερμηνεύεται από τη συμπεριφορά που παρουσιάζουν τα θεμελιώδη Rayleigh κύματα. Ο Bard (1999) πρότεινε ότι η θεωρητική εξήγηση που παρέχεται μέσω του λόγου ελλειπτικότητας των Rayleigh κυμάτων είναι η πιο σωστή για τη συμπεριφορά αυτή, αλλά όχι επαρκής. Ο Horike (1996) υποστήριξε ότι η παραπάνω υπόθεση των θεμελιωδών κυμάτων Rayleigh ισχύει μόνο σε απλές δομές. Οι θεωρητικές προσεγγίσεις βασίζονται μόνο στην παρατήρηση της ομοιότητας μεταξύ του λόγου οριζόντιας προς κατακόρυφης συνιστώσας του εδαφικού θορύβου και της θεμελιώδους αρμονικής των Rayleigh κυμάτων (Nakamura, 2000). Οι Konno και Ohmachi (1998) συγκρίνοντας την ελλειπτικότητα των Rayleigh κυμάτων σε ιζήματα που παρουσιάζουν πολύπλοκη δομή ταχυτήτων και τη συνάρτηση μεταφοράς των S-κυμάτων, καθώς και το λόγο οριζόντιας προς κατακόρυφης συνιστώσας του εδαφικού θορύβου, παρατήρησαν αρκετές ομοιότητες. Η ταυτόχρονη ύπαρξη Love κυμάτων στο κυματικό πεδίο του εδαφικού θορύβου επηρεάζει την κατακόρυφη συνιστώσα καθώς η φάση Airy των Love κυμάτων είναι πολύ κοντά στην θεμελιώδη συχνότητα των S-κυμάτων. Σύμφωνα με τον Bard (1999) η ερμηνεία των Nogoshi και Igarashi δεν ισχύει στην περίπτωση που στο κυματικό πεδίο του εδαφικού θορύβου συμμετέχει μεγάλο ποσοστό κυμάτων χώρου.

Οι Konno και Ohmachi (1998) εκτίμησαν το κάτω όριο της αντίθεσης των ταχυτήτων χαλαρών σχηματισμών - υποβάθρου περίπου στο 2.5. Οι Ansary et al. (1995) πρότειναν ένα κάτω όριο περίπου στο 3.3 και 5.5 για μονοδιάστατη δομή και πάνω από 2.5 για περίπλοκες δομές. Όπως προαναφέρθηκε η κορυφή στο λόγο οριζόντιας προς κατακόρυφη του εδαφικού θορύβου και η θεμελιώδης συχνότητα των S-κυμάτων συμπίπτουν αν η τιμή της αντίθεσης είναι περίπου 3 (Bard, 1999). Οι παρατηρούμενες διαφορές μεταξύ του λόγου οριζόντιας προς κατακόρυφη και της θεμελιώδους συχνότητας των S-κυμάτων οφείλεται στην εξάλειψη της κατακόρυφης συνιστώσας της θεμελιώδους συχνότητας των Rayleigh κυμάτων. Οι Trifunac και Todorovska (2000) απέδειξαν ότι η τεχνική του λόγου οριζόντιας προς

κατακόρυφη συνιστώσα του εδαφικού θορύβου είναι πιο ακριβής για δομές που έχουν μεγάλη τιμή εμπέδησης μεταξύ των επιφανειακών στρωμάτων και του ημιχώρου. Αντίθετα, οι Al-Yuncha και Luzon (2000) χρησιμοποίησαν την ίδια τεχνική για δομές με χαμηλές τιμές εμπέδησης.

3.1.1. Ερμηνεία της μεθόδου HVSR σύμφωνα με τον Nakamura

Ο Nakamura (1989) βασιζόμενος στην επίδραση των σεισμικών κυμάτων στο σήμα του εδαφικού θορύβου και τη διάδοσή τους για την εκτίμηση της εδαφικής σεισμικής κίνησης παρουσίασε την εφαρμογή του λόγου της οριζόντιας προς την κατακόρυφη συνιστώσα του εδαφικού θορύβου για να εκτιμήσει την δυναμική απόκριση του εδάφους. Για να αποδείξει την εφαρμογή της τεχνικής αυτής για τον γεωτεχνικό χαρακτηρισμό του εδάφους σύγκρινε το φάσμα Fourier καταγραφών 24 ωρών από δύο σταθμούς τρένων στην Ιαπωνία, στις θέσεις Kamonomiya και Tabata (Σχήμα 4).

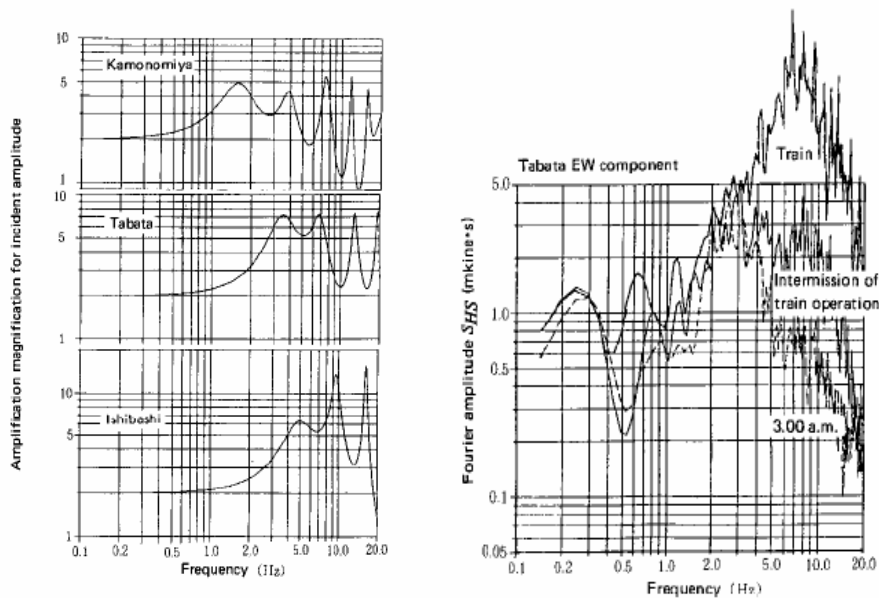


Σχήμα 4: Το φάσμα Fourier του εδαφικού θορύβου στους σταθμούς Kamonomiya και Tabata (Nakamura, 1989).

Το πλάτος της εδαφικής ταχύτητας, καθώς και τα χαρακτηριστικά του φάσματος του εδαφικού θορύβου στις δύο θέσεις αλλάζουν με το χρόνο. Το παρατηρούμενο εύρος των καμπυλών της θεμελιώδης συχνότητας του εδαφικού θορύβου οφείλεται σε τεχνητές πηγές θορύβου από τις γραμμές των τρένων. Η επίδραση των τρένων είναι αξιοπρόσεκτη ειδικά στην κατακόρυφη συνιστώσα του θορύβου όπου εισάγονται τα κύματα Rayleigh.

Η σύγκριση των φασμάτων μεταξύ καταγραφών στις οποίες υπάρχει διέλευση τρένου και ήσυχης περιόδου αποδεικνύει την επίδραση των τρένων στο θόρυβο και στο πλάτος του φάσματος Fourier (Σχήμα 5). Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν και δεδομένα από γεωτεχνικές γεωτρήσεις και γεωφυσικές διαγραφίες P-κυμάτων.

Οι παρατηρούμενες διαφορές στις συναρτήσεις μεταφοράς που υπολογίστηκαν από γεωφυσικές διαγραφίες και από την τεχνική του εδαφικού θορύβου ερμηνεύονται από την παρουσία των Rayleigh κυμάτων. Ο Nakamura (1989) πρότεινε ένα νέο τρόπο υπολογισμού της συνάρτησης μεταφοράς για την εκτίμηση της απόκρισης του εδάφους στη σεισμική κίνηση, θεωρώντας ότι η εισαγωγή των Rayleigh κυμάτων επιδρά ως θόρυβος και πρέπει να απαλειφθεί από τον υπολογισμό των συναρτήσεων μεταφοράς. Οι βασικές παραδοχές που έκανε για να υποστηρίξει την προσέγγιση του ήταν οι εξής:



Σχήμα 5: Σύγκριση των συναρτήσεων μεταφοράς μεταξύ των σταθμών που υπολογίστηκαν από τις οριζόντιες συνιστώσες και από δεδομένα διαγραφιών (αριστερά). Το φάσμα Fourier για δεδομένα που έχουν θόρυβο εξαιτίας της διέλευσης τρένου και ήσυχης περιόδου (δεξιά) (Nakamura, 1989).

- Ο λόγος της οριζόντιας προς κατακόρυφη συνιστώσα στο βράχο είναι ίσος με τη μονάδα, άρα δεν υπάρχει ενίσχυση σε σκληρά-βραχώδη εδάφη.
- Χωρίζοντας τον εδαφικό θόρυβο σε οριζόντια και κατακόρυφη συνιστώσα θεωρούμε ότι τα χαρακτηριστικά του σήματος είναι όμοια σε όλες τις διευθύνσεις.
- Η οριζόντια συνιστώσα ενισχύεται από πολλαπλές ανακλάσεις των εγκάρσιων κυμάτων και η κατακόρυφη από πολλαπλές ανακλάσεις των επιμήκων κυμάτων.
- Η κατακόρυφη συνιστώσα του εδαφικού θορύβου διατηρεί τα χαρακτηριστικά της πηγής ως την επιφάνεια και η επίδραση των Rayleigh κυμάτων στο φάσμα υπάρχει μόνο στο επιφανειακό στρώμα.

Για να μελετήσει τα δυναμικά χαρακτηριστικά του εδάφους και των κατασκευών χρησιμοποιώντας εδαφικό θόρυβο, ο Nakamura υπολόγισε τον παράγοντα ενίσχυσης που προκύπτει από πολλαπλές ανακλάσεις κάθετων SH κυμάτων και απάλειψε την επίδραση των κυμάτων Rayleigh από το λόγο της οριζόντιας προς την κατακόρυφη συνιστώσα, θεωρώντας τον ως θόρυβο.

Γενικότερα ορίζουμε τη συνάρτηση μεταφοράς σε ένα επιφανειακό στρώμα ως:

$$S_T = \frac{S_{HS}}{S_{HB}}, \quad (1)$$

όπου S_{HS} και S_{HB} είναι τα οριζόντια φάσματα του εδαφικού θορύβου στην επιφάνεια (s) και στον ημιχώρο (B) αντίστοιχα.

Για μεγάλο εύρος συχνοτήτων ο λόγος της οριζόντιας προς την κατακόρυφη συνιστώσα των S -κυμάτων χώρου στον ημιχώρο, R_B , είναι ίσος με τη μονάδα, δηλαδή:

$$R_B = \frac{S_{HB}}{S_{VB}} \approx 1. \quad (2)$$

Υποθέτοντας ότι η κατακόρυφη συνιστώσα του σήματος δεν ενισχύεται καθώς περνά μέσα από το επιφανειακό στρώμα, ο λόγος E_s αναπαριστά την επίδραση των Rayleigh κυμάτων στην κατακόρυφη συνιστώσα:

$$E_s = \frac{S_{VS}}{S_{VB}}. \quad (3)$$

Αν δεν υπάρχει επίδραση των Rayleigh κυμάτων τότε ο λόγος E_s είναι ίσος με τη μονάδα (ημιχώρος). Καθώς η επίδραση των Rayleigh κυμάτων μεγαλώνει, ο λόγος E_s γίνεται μεγαλύτερος από τη μονάδα.

Υποθέτοντας ότι η επίδραση των Rayleigh κυμάτων είναι η ίδια και στις δύο συνιστώσες (κατακόρυφη και οριζόντια), ο λόγος $S_{TT} = \frac{S_T}{E_s}$ μπορεί να θεωρηθεί σαν μια αξιόπιστη συνάρτηση μεταφοράς, αφού διορθώνει την ενίσχυση των S -κυμάτων για την επίδραση των Rayleigh κυμάτων. Ο λόγος αυτός μπορεί να αναπαραχθεί από την εξίσωση:

$$S_{TT} = \frac{S_T}{E_s} = \frac{\frac{S_{HS}}{S_{VB}}}{\frac{S_{VS}}{S_{VB}}} = \frac{S_{HS}}{S_{VS}} = \frac{R_s}{R_B}, \quad (4)$$

όπου R_s και R_B είναι ο λόγος των φασμάτων της οριζόντιας προς την κατακόρυφη συνιστώσα στην επιφάνεια και στον ημιχώρο αντίστοιχα. Θεωρώντας ότι η τιμή του R_B είναι μονάδα (σχέση 2.2), η εξίσωση απλουστεύεται στην

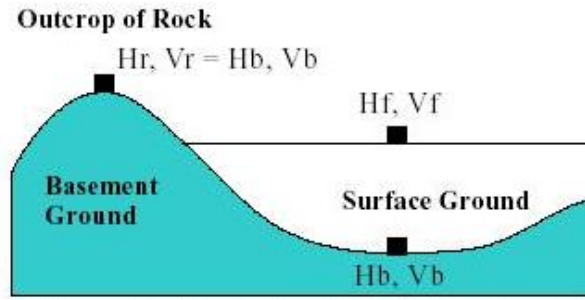
$$S_{TT} = R_s = \frac{S_{HS}}{S_{VS}}. \quad (5)$$

Η σχέση (5) δείχνει ότι είναι δυνατό να υπολογιστούν τα δυναμικά χαρακτηριστικά του εδάφους (συνάρτηση μεταφοράς) χρησιμοποιώντας μετρήσεις εδαφικού θορύβου μόνο στην επιφάνεια (S_{HS} , S_{VS}).

Ο Nakamura χρησιμοποίησε δεδομένα από σεισμούς, διαγραφίες και εδαφικό θόρυβο για σύγκριση και επιβεβαίωση της προτεινόμενης τεχνικής. Η παρατηρούμενη σταθερότητα στην συχνότητα και το πλάτος όλων των δεδομένων αποδεικνύει ότι η μέθοδος μπορεί σε πολλές περιπτώσεις να εκτιμήσει πειραματικά τα δυναμικά χαρακτηριστικά του εδάφους.

Σε νεότερη μελέτη του, ο Nakamura (1996) παρουσίασε λεπτομερέστερη μελέτη του λόγου οριζόντιας προς κατακόρυφη συνιστώσα του εδαφικού θορύβου για την εύρεση των δυναμικών χαρακτηριστικών του εδάφους, εξετάζοντας τόσο την επίδραση των κυμάτων χώρου όσο και των επιφανειακών στο φάσμα του εδαφικού θορύβου. Μετονόμασε την τεχνική από HVSR σε **Quasi-Transfer Spectrum** και παρουσίασε την εφαρμογή της και στον προσδιορισμό της σεισμικής απόκρισης των κατασκευών. Η τροποποιημένη τεχνική του Nakamura (1996) συνοψίζεται ως εξής:

Μια τυπική ιζηματογενής λεκάνη έχει τη μορφή του σχήματος (6):



Σχήμα 6: Τυπική μορφή μιας ιζηματογενούς λεκάνης (Nakatima, 2000, τροποποιημένο).

όπου H_r και V_r είναι η οριζόντια και κατακόρυφη κίνηση στο επιφανειακό βραχώδες υπόβαθρο, H_b και V_b είναι οι αντίστοιχες κινήσεις στον ημιχώρο και H_f και V_f είναι οι αντίστοιχες κινήσεις στην επιφάνεια των ιζημάτων. Υπό την υπόθεση ότι στην επιφάνεια της λεκάνης η επίδραση των επιφανειακών κυμάτων οφείλεται στη γεωμετρία της λεκάνης, ορίζονται οι παράγοντες ενίσχυσης H_f , V_f , T_h και T_v ως εξής:

$$H_f = A_h \cdot H_b + H_s \quad (6)$$

$$T_h = \frac{H_f}{H_b} \quad (7)$$

$$V_f = A_v \cdot V_b + V_s \quad (8)$$

$$T_v = \frac{V_f}{V_b} \quad (9)$$

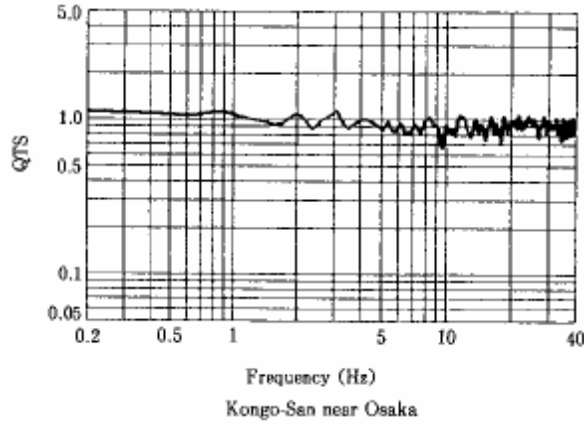
όπου H_s και V_s είναι τα φάσματα οριζόντιας και κατακόρυφης συνιστώσας των επιφανειακών κυμάτων, A_h και A_v είναι παράγοντες ενίσχυσης οριζόντιας και κατακόρυφης κίνησης κατακόρυφα προσπίπτοντος κύματος χώρου, T_h και T_v είναι οι συνολικοί παράγοντες ενίσχυσης της οριζόντιας και κατακόρυφης κίνησης στην επιφάνεια εξαιτίας της σεισμικής κίνησης στον ημιχώρο.

Η συνάρτηση μεταφοράς στην επιφάνεια της λεκάνης, όπως ορίστηκε στην εξίσωση (4) εκφράζεται τώρα ως:

$$QTS = \frac{H_f}{V_f} = \frac{A_h \cdot H_b + H_s}{A_v \cdot V_b + V_s} = \frac{H_b}{V_b} \cdot \frac{\left[A_h + \frac{H_s}{H_b} \right]}{\left[A_v + \frac{V_s}{V_b} \right]} \quad (10)$$

Οι βασικές υποθέσεις της τεχνικής QTS είναι:

1. Τα φάσματα της οριζόντιας, H_{bs} και κατακόρυφης, V_{bs} συνιστώσας στο βράχο είναι ίδια. Επομένως ο λόγος των φασμάτων στο βράχο είναι ίσος με τη μονάδα, δηλαδή $H_b/V_b \approx 1$ (σχ. 7).
2. Στα ιζήματα η κατακόρυφη συνιστώσα δεν ενισχύεται ($A_v \approx 1$) στην περιοχή των συχνοτήτων που ενισχύεται η οριζόντια συνιστώσα.
3. Η παραπάνω υπόθεση σημαίνει ότι αν δεν υπάρχει επίδραση των κυμάτων Rayleigh ($V_s \approx 0$) (τότε το φάσμα της κατακόρυφης συνιστώσας στην επιφάνεια είναι ίσο με αυτό του ημιχώρου ($V_f \approx V_b$)).
4. Αν υπάρχει σημαντική επίδραση των Rayleigh κυμάτων τότε το φάσμα της κατακόρυφης συνιστώσας στην επιφάνεια είναι μεγαλύτερο από αυτό του ημιχώρου ($V_f > V_b$).



5.

Σχήμα 7: QTS σε βραχώδες υπόβαθρο στην περιοχή UrEDAS, Kongo-San, Ιαπωνία (Nakamura, 1996)

Διορθώνοντας, όπως και πριν, τη συνάρτηση μεταφοράς των οριζοντίων κινήσεων (σχέση 7) για την επίδραση των κυμάτων Rayleigh, όπως αυτή προσεγγίζεται από την ενίσχυση της κατακόρυφης συνιστώσας (σχέση 2.2), ο παράγοντας ενίσχυσης της οριζόντιας κίνησης γράφεται ως:

$$T_h^* = \frac{T_h}{T_v} = \frac{\frac{H_f}{H_b}}{\frac{V_f}{V_b}} = \frac{\frac{H_f}{V_f}}{\frac{H_b}{V_b}} = \frac{QTS}{\frac{H_b}{V_b}} = \frac{\left[A_h + \frac{H_s}{H_b} \right]}{\left[A_v + \frac{V_s}{V_b} \right]} \quad (11)$$

Εφόσον οι λόγοι H_s/H_b και V_s/V_b σχετίζονται άμεσα με την ενέργεια των κυμάτων Rayleigh προκύπτουν τα παρακάτω:

1. $QTS = A_h / A_v$, αν δεν υπάρχει καμία επίδραση των κυμάτων Rayleigh.
2. $QTS = H_s / V_s$, αν το ποσοστό συμμετοχής των κυμάτων Rayleigh είναι υψηλό.
3. $QTS = A_h$, αν το $V_b \gg V_s$ και $H_b \gg H_s$, δεχόμενοι ότι $A_v \approx 1$.

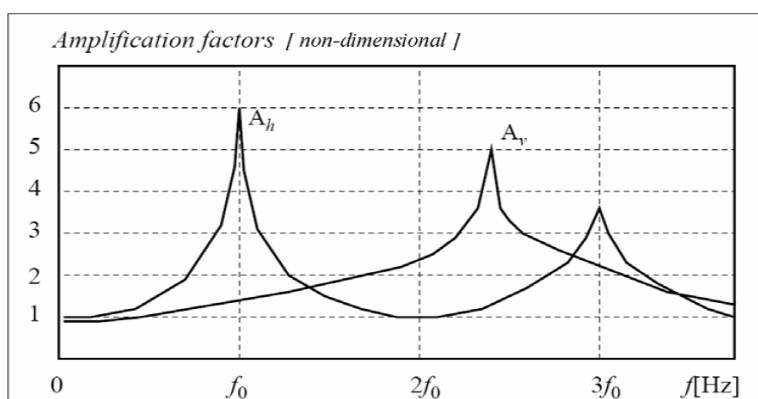
Αν δεν υπάρχει καμία επίδραση των κυμάτων Rayleigh (περίπτωση 1) τότε οι όροι H_s , V_s στην εξίσωση (11) γίνονται μηδέν, οπότε η ποσότητα QTS ίση με το λόγο A_h/A_v , δηλαδή το λόγο ενισχύσεων των κυμάτων χώρου. Στο σχήμα (8) αναπαριστώνται οι οριζόντιες και κατακόρυφες ενισχύσεις της επιφανειακής εδαφικής κίνησης για την τυπική λεκάνη του σχήματος (6). Σύμφωνα με το σχήμα (8), η καμπύλη του λόγου A_h/A_v θα παρουσιάζει τοπικό μέγιστο στην περιοχή της f_0 , κοίλο μέρος περίπου στην περιοχή της $2f_0$ και ακόμα ένα μικρότερο τοπικό μέγιστο στην περιοχή της $3f_0$. Το δεύτερο τοπικό μέγιστο (περιοχή $3f_0$) θα είναι μικρότερο γιατί η τιμή του A_h είναι μικρότερη, ενώ η τιμή του A_v μεγαλύτερη με τελικό αποτέλεσμα τη μικρότερη τιμή του λόγου A_h/A_v . Το κοίλο μέρος της καμπύλης περίπου στην περιοχή της $2f_0$ οφείλεται στη μεγαλύτερη τιμή του A_v σε σχέση με το A_h . Άρα η συνολική μορφή της καμπύλης του λόγου A_h/A_v θα παρουσιάζει το μεγαλύτερο τοπικό μέγιστο στη θέση της f_0 .

Όταν το ποσοστό των κυμάτων Rayleigh στον εδαφικό θόρυβο είναι υψηλό (περίπτωση 2) τότε $H_s \gg H_b$ και $V_s \gg V_b$. Επομένως, μπορούμε να θεωρήσουμε τους παράγοντες ενίσχυσης A_h και A_v αμελητέους, οπότε:

$$QTS = \frac{\frac{H_s}{H_b}}{\frac{V_s}{V_b}} = \frac{\frac{H_s}{V_b}}{\frac{H_b}{V_b}} \cong \frac{H_s}{V_s} \quad (11)$$

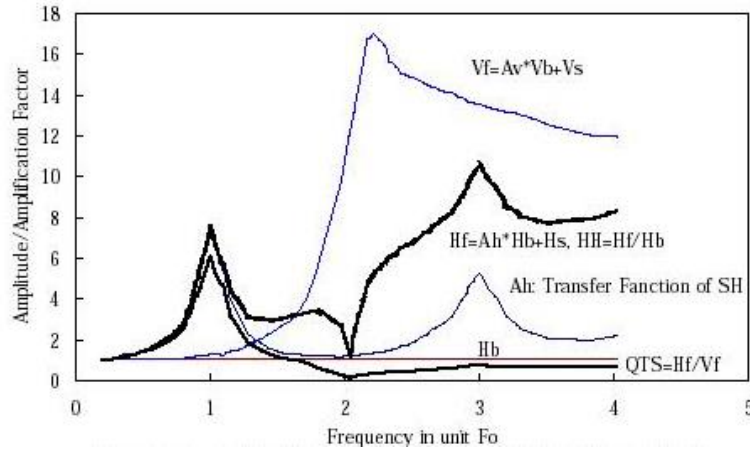
Όπως αναφέρθηκε, η καμπύλη του φασματικού λόγου της οριζόντιας προς την κατακόρυφη κίνηση που οφείλεται στα κύματα Rayleigh εμφανίζει ένα απότομο μέγιστο κοντά στη θεμελιώδη ιδιοσυχνότητα f_0 για περιοχές όπου υπάρχει αρκετά μεγάλη διαφορά εμπέδησης μεταξύ των επιφανειακών και βαθύτερων στρωμάτων του υπεδάφους, άρα πάλι η καμπύλη QTS θα εμφανίσει μέγιστο στην περιοχή της f_0 .

Όταν η εδαφική κίνηση στο υπόβαθρο είναι αρκετά μεγαλύτερη από την εδαφική κίνηση που οφείλεται στα κύματα Rayleigh στην επιφάνεια (περίπτωση 3) τότε οι φασματικοί λόγοι H_s/H_b και V_s/V_b γίνονται σχεδόν μηδέν (ή πολύ μικρότεροι της μονάδας) αφού οι παρονομαστές των κλασμάτων είναι πολύ μεγαλύτεροι από τους αριθμητές. Επίσης ο παράγοντας ενίσχυσης A_v είναι περίπου ίσος με τη μονάδα για την περιοχή της f_0 . Επομένως, η ποσότητα QTS μπορεί να θεωρηθεί σχεδόν ίση με το A_h ή με άλλα λόγια η ποσότητα QTS αποτελεί χαμηλότερη προσεγγιστική τιμή του A_h (Carniel et al., 2006), τουλάχιστον στην περιοχή της f_0 . Δηλαδή και σε αυτή την περίπτωση η καμπύλη QTS θα παρουσιάζει μέγιστο στη θέση της f_0 .



Σχήμα 8: Σχηματική αναπαράσταση των οριζόντιων και κατακόρυφων ενισχύσεων της εδαφικής κίνησης, όταν αποτελείται από κύματα χώρου. Ο οριζόντιος άξονας είναι σε αδιάστατες μονάδες θεμελιώδους συχνότητας (Carniel et al., 2006).

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η τεχνική QTS μπορεί σε κάθε περίπτωση να εκτιμήσει την ιδιοσυχνότητα f_0 του εδάφους εξαιτίας των πολλαπλών ανακλάσεων των S_H -κυμάτων στα επιφανειακά στρώματα, ανεξάρτητα από την επίδραση των κυμάτων Rayleigh. Επιπλέον, αν η επίδραση των κυμάτων Rayleigh είναι έντονη, τότε ο λόγος QTS είναι μικρότερος της μονάδας σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Αντίθετα, αν η επίδραση των κυμάτων Rayleigh δεν είναι έντονη τότε ο λόγος QTS πάλι είναι μικρότερος από τη μονάδα, σε μια στενή περιοχή τρεις φορές μεγαλύτερη της ιδιοσυχνότητας, εξαιτίας της επίδρασης της κατακόρυφης συνιστώσας της κίνησης.



Σχήμα 9: Το φάσμα της οριζόντιας και κατακόρυφης συνιστώσας στην επιφάνεια μιας ιζηματογενούς λεκάνης, ο λόγος $A_h = H_f/H_b$ με χρήση κλασσικού φασματικού λόγου (SSR) και H_f/V_f με χρήση της τεχνικής QTS (Nakamura, 2000).

Η σύγκριση των ποσοτήτων H_f , V_f , H_f/H_b χρησιμοποιώντας την τεχνική του κλασσικού φασματικού λόγου και του λόγου H_f/V_f χρησιμοποιώντας εδαφικό θόρυβο γίνεται στο σχήμα (9). Καθώς στο φάσμα της οριζόντιας συνιστώσας κίνησης H_f υπάρχει και η επίδραση των κυμάτων Rayleigh, η ενίσχυση του λόγου H_f/H_b που προκύπτει από την SSR τεχνική είναι μεγαλύτερη από τη θεωρητική τιμή της συνάρτησης μεταφοράς. Αντίθετα η ενίσχυση του λόγου QTS είναι μικρότερη από τη θεωρητική τιμή της συνάρτησης μεταφοράς.

Στη βασική αυτή εργασία του, ο Nakamura (2000) βασίστηκε στην υπόθεση ότι ο εδαφικός θόρυβος αποτελείται από κύματα χώρου και επιφανειακά κύματα Rayleigh ή από διαφορετικά κύματα χώρου. Η τεχνική QTS μπορεί να εφαρμοστεί ώστε να προσδιοριστεί η θεμελιώδη συχνότητα των επιφανειακών σχηματισμών εξαιτίας των πολλαπλών ανακλάσεων των SH κυμάτων, καθώς και μια εκτίμηση για το πλάτος ενίσχυσης, δίνοντας έτσι με αρκετά καλή ακρίβεια μερικά από τα δυναμικά χαρακτηριστικά των επιφανειακών σχηματισμών.

3.1.2. Υπολογισμός της δομής των επιφανειακών εδαφικών σχηματισμών με τη χρήση δεδομένων εδαφικού θορύβου

Το πλάτος της εδαφικής απόκρισης για ένα κύμα που προσπίπτει στην επιφάνεια είναι μέγιστο κοντά στη θεμελιώδη συχνότητα της εδαφικής στήλης (Nakamura, 2000). Η θεμελιώδης συχνότητα της δομής, όπως υπολογίζεται για ένα κάθετα προσπίπτον κύμα, που διαδίδεται σε ένα μονοδιάστατο ελαστικό μέσο είναι συνάρτηση του πάχους του μέσου (h) και της μέσης τιμής της ταχύτητας των εγκάρσιων κυμάτων (C_s). Η θεμελιώδης συχνότητα ενός επιφανειακού σχηματισμού F_0 δίδεται από την εξίσωση:

$$F_0 = \frac{C_s}{4h}. \quad (12)$$

Το πλάτος ενίσχυσης στη θεμελιώδη συχνότητα είναι συνάρτηση του πάχους του στρώματος (h), της ταχύτητας διάδοσης των κυμάτων στα χαλαρά ιζήματα (C_s) και το βραχώδες υπόβαθρο (C_b), των πυκνοτήτων των σχηματισμών και του παράγοντα απόσβεσης ζ του κύματος.

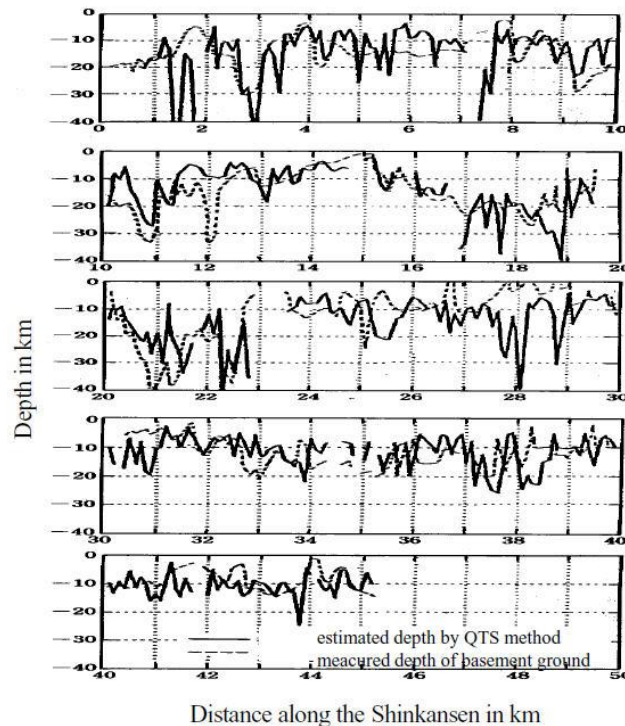
Αν θεωρήσουμε ότι δεν υπάρχει σημαντική απόσβεση και ότι η πυκνότητα είναι περίπου η ίδια και στα δύο στρώματα (ιζήματα και υπόβαθρο), τότε το πλάτος ενίσχυσης στη θεμελιώδη συχνότητα θα δίδεται από την εξίσωση:

$$A_0 = \frac{C_b}{C_s}. \quad (13)$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση προκύπτει ότι το πάχος των επιφανειακών σχηματισμών θα είναι ίσο με:

$$h = \frac{C_b}{4A_0 \cdot F_0} \quad (14)$$

Η πρώτη εφαρμογή της παραπάνω προσέγγισης έγινε από τον Nakamura (1996) ο οποίος υπολόγισε το πάχος των ιζημάτων με τη χρήση του εδαφικού θορύβου κατά μήκος της γραμμής του εναέριου σιδηροδρόμου Shinkansen και το σύγκρινε με δεδομένα από γεωτρήσεις, διαπιστώνοντας καλή συμφωνία (Σχήμα 10).



Σχήμα 10: Σύγκριση του βάθους όπως υπολογίστηκε από γεωτρήσεις με αυτό που υπολογίστηκε από τις μετρήσεις εδαφικού θορύβου κατά μήκος γραμμής του εναέριου σιδηροδρόμου Shinkansen (Nakamura, 2000).

3.2. Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων εδαφικού θορύβου

3.2.1. Συλλογή δεδομένων εδαφικού θορύβου

Παρά το γεγονός ότι πολλοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί τις τελευταίες δεκαετίες με δεδομένα εδαφικού θορύβου, δεν υπάρχει μια γενικά αποδεκτή διαδικασία για τη συλλογή τους. Μόλις το 1998 ο Mucciarelli συγκέντρωσε και συνόπισε σε μια δημοσίευση γενικές αρχές που πρέπει να τηρούνται για την συλλογή μετρήσεων εδαφικού θορύβου. Το 2000 στην Ευρώπη στο πλαίσιο του Ευρωπαϊκού προγράμματος *SESAME* (*Site EffectS assessment using AMbient Excitations, European Commission – Research Directorate-General, Contract No: EVG1-CT-2000-00026*) διενεργήθηκαν πολυάριθμες μετρήσεις με σκοπό τη δημιουργία μιας πρότυπης μεθοδολογίας για τη συλλογή, αλλά και την επεξεργασία δεδομένων εδαφικού θορύβου. Τα συμπεράσματα στα οποία κατέληξε το συγκεκριμένο έργο αφορούν τρεις βασικές κατηγορίες:

- Όργανα και τρόπος καταγραφής δεδομένων.

- Βέλτιστες θέσεις πραγματοποίησης των μετρήσεων.
- Επηρεασμός των δεδομένων από εξωτερικούς παράγοντες.

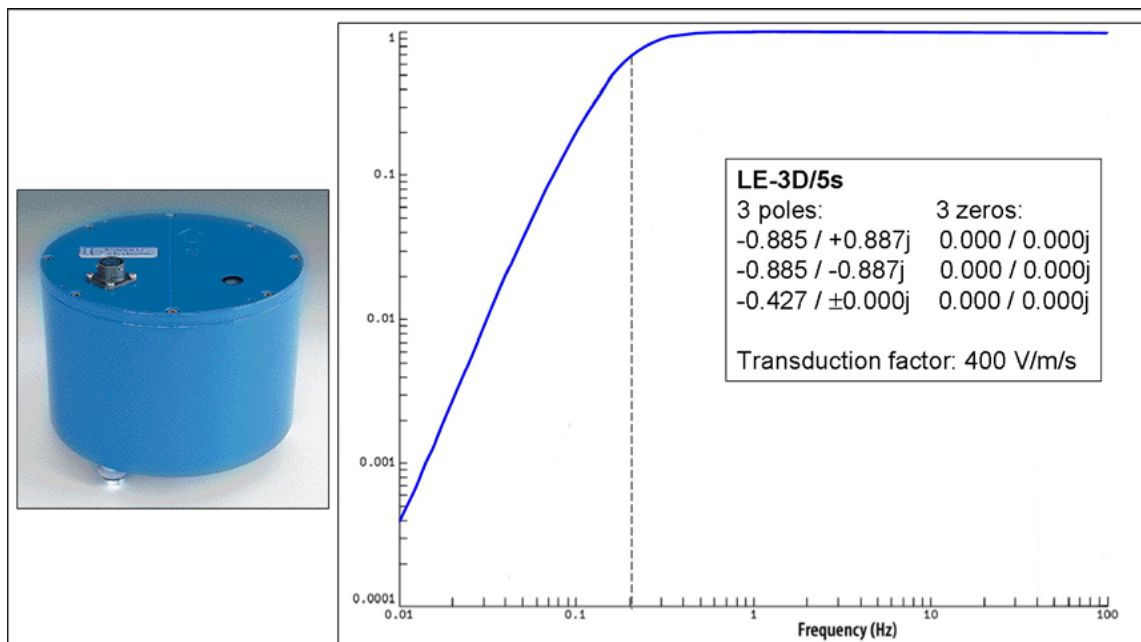
Τα αποτελέσματα έχουν δημοσιευτεί σε σειρά εργασιών (Guillier et al. 2002, Cara et al. 2003, Atakan et al. 2004-b, Duval et al.2004b, Koller et al. 2004) από την ερευνητική ομάδα του *SESAME* (<http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/>). Μια περιεκτική σύνοψη στα

ελληνικά παρουσιάζεται από την Πάνου (2007) και υπάρχει αυτούσια στο παράρτημα Γ της παρούσας διατριβής. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων εδαφικού θορύβου για την παρούσα διδακτορική διατριβή έγινε προσπάθεια ώστε όλες οι παραπάνω παράμετροι και προδιαγραφές του *SESAME* να ληφθούν υπόψη κατά τη διαδικασία λήψης των δεδομένων.

3.2.2. Όργανα καταγραφής εδαφικού θορύβου

Για τη διεξαγωγή μετρήσεων εδαφικού θορύβου τα όργανα καταγραφής μπορούν να είναι τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα όργανα καταγραφής σεισμικού σήματος που χρησιμοποιούνται από σεισμολογικά δίκτυα. Ανάλογα με τη θεμελιώδη συχνότητα των εδαφικών σχηματισμών μπορούν να χρησιμοποιηθούν εδαφικοί αισθητήρες βραχείας ή μακράς περιόδου. Το μειονέκτημα χρήσης αισθητήρων μακράς περιόδου είναι ο χρόνος που απαιτείται για να έρθουν σε ηρεμία, ο οποίος μπορεί να ποικίλει από λίγα έως μερικές δεκάδες λεπτά. Εξαιτίας αυτού, προτείνεται να χρησιμοποιούνται αισθητήρες με μικρό χρόνο ηρεμίας.

Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκε ο αισθητήρας καταγραφής εδαφικής ταχύτητας Lennartz Le3D/5s. Ο συγκεκριμένος αισθητήρας είναι τριών συνιστωσών με ιδιοπερίοδο πέντε δευτερολέπτων (ενδιαμέσου φάσματος). Η κρίσιμη απόσβεση του έχει τιμή 0.707 και η ευαισθησία του είναι 400V/m/sec. Παρουσιάζει επίπεδη απόκριση στην εδαφική ταχύτητα περίπου μεταξύ των συχνοτήτων 0.2 – 100 Hz (σχήμα 11).



Σχήμα 11: Αισθητήρας εδαφικής ταχύτητας Lennartz Le3D/5s (αριστερά) καθώς και η καμπύλη απόκρισής του (<http://www.lennartz-electronic.de>)

Για την καταγραφή και ψηφιοποίηση του σεισμικού σήματος χρησιμοποιήθηκε το καταγραφικό City Shark II του οίκου LEAS (σχήμα 12). Ο συγκεκριμένος καταγραφέας έχει κατασκευαστεί ειδικά για μετρήσεις εδαφικού θορύβου, παρουσιάζοντας το σαφές πλεονέκτημα της φορητότητας (εσώκλειστος σε θήκη μεγάλης αντοχής), της ευκολίας διεξαγωγής μετρήσεων και του μικρού του όγκου (βάρους 10 κιλά,

όγκος 253 κ.ε.). Η αποθήκευση των δεδομένων γίνεται σε σκληρό δίσκο τύπου flash card. Διαθέτει οθόνη υγρών κρυστάλλων για την διευκόλυνση της παραμετροποίησης των μετρήσεων στο πεδίο.

Παράλληλα, παρέχει τη δυνατότητα προγραμματισμού επαναλαμβανόμενων μετρήσεων και αυτόματης αποθήκευσης των δεδομένων. Επίσης, έχει τη δυνατότητα σύνδεσης με Όργανο

Προσδιορισμού Γεωγραφικών Συντεταγμένων (GPS). Στην παρούσα διατριβή για τον προσδιορισμό των συντεταγμένων ανά θέση μέτρησης χρησιμοποιήθηκε φορητή συσκευή προσδιορισμού γεωγραφικών συντεταγμένων υψηλής ακριβείας.

3.2.3. Επεξεργασία δεδομένων εδαφικού θορύβου με τη χρήση μονού σταθμού

Για την ανάλυση των δεδομένων της παρούσας διατριβής χρησιμοποιήθηκε το ειδικά κατασκευασμένο λογισμικό **GEOPSY**, το οποίο αναπτύχθηκε στα πλαίσια του προγράμματος SESAME. Το λογισμικό **GEOPSY** (<http://geopsy.org>) εξελίσσεται συνεχώς, παρέχοντας στο χρήστη ένα εύχρηστο περιβάλλον εργασίας και αυτοματοποιημένες διαδικασίες για τη μαζική επεξεργασία δεδομένων εδαφικού θορύβου. Η διαδικασία επεξεργασίας που ακολουθήθηκε είναι η εξής:



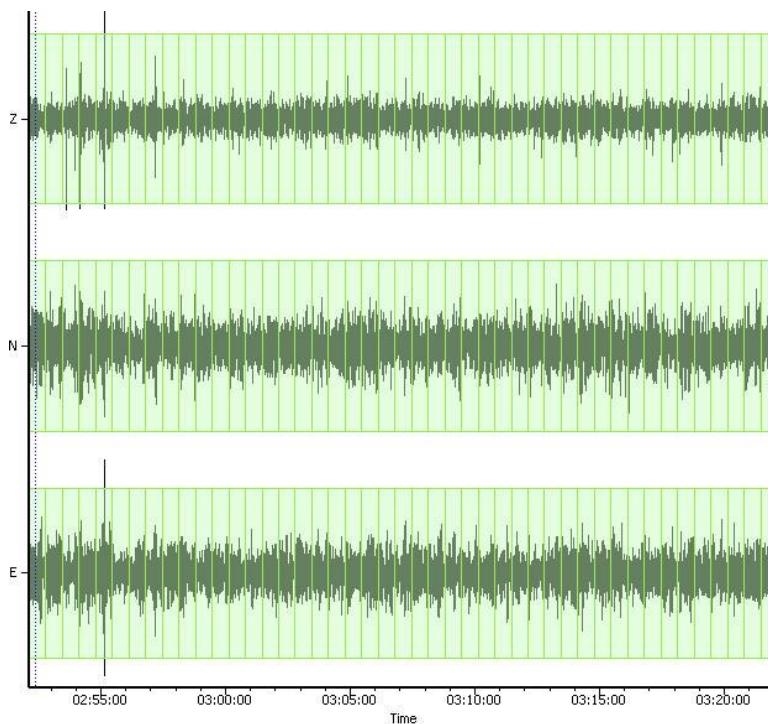
Σχήμα 12: Καταγραφικό City Shark II του οίκου LEAS (<http://www.leas.fr>).

- Αφαίρεση της μέσης στάθμης από τις τρεις συνιστώσες.
- Εφαρμογή ζωνοπερατού φίλτρου διέλευσης συχνοτήτων στην περιοχή 0.2-20 Hz. Η επιλογή του εύρους συχνοτήτων έγινε με κύριο κριτήριο το ιδιαίτερο γεωτεχνικό/σεισμολογικό ενδιαφέρον σε αυτό το εύρος συχνοτήτων.
- Επιλογή χρονικών παραθύρων καταγραφής 40 δευτερολέπτων, χωρίς αλληλοεπικάλυψη μεταξύ τους. Η επιλογή του εύρους του παραθύρου έγινε με βασικό κριτήριο την ελάχιστη συχνότητα ενδιαφέροντος, η οποία είναι τα 0.2 Hz, λόγω και του χρησιμοποιούμενου αισθητήρα. Επιλέχθηκαν για κάθε διαθέσιμη κυματομορφή 45 χρονικά παράθυρα, χωρίς αρχικό έλεγχο της ποιότητας της καταγραφής.
- Υπολογισμός του φάσματος με μετασχηματισμό Fourier για κάθε παράθυρο και κάθε συνιστώσα ξεχωριστά.

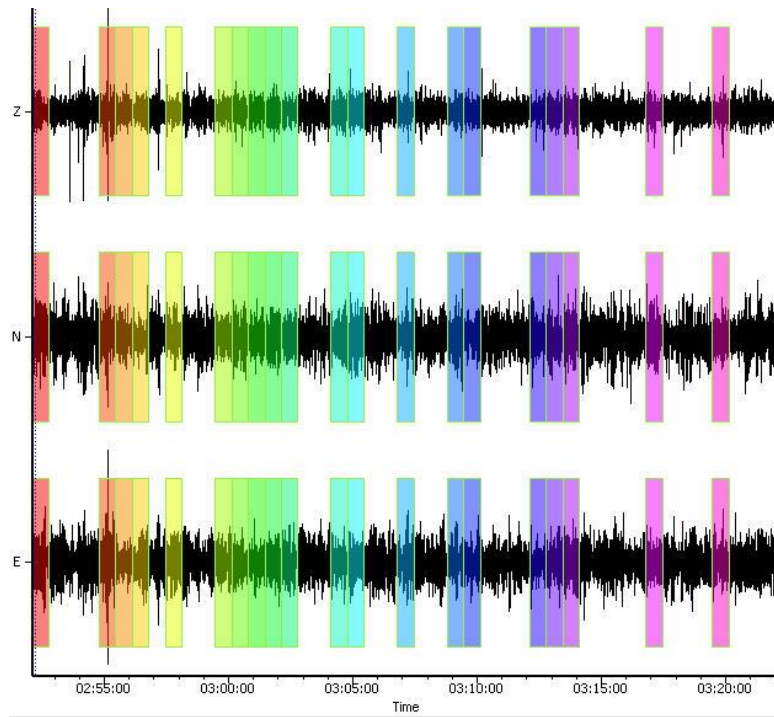
- Εξομάλυνση των φασμάτων με την τεχνική που πρότειναν οι *Konno και Ohmachi* (1998) και με τον παράγοντα b ίσο με 40. Με τη συγκεκριμένη τεχνική το παράθυρο εξομάλυνσης έχει σταθερό εύρος σε λογαριθμική κλίμακα συχνοτήτων.
- Συνμητονικό φίλτρο απόληξης (tapering) σε ποσοστό 5%.
- Υπολογισμός του γεωμετρικού μέσου των δύο οριζόντιων συνιστωσών για κάθε χρονικό παράθυρο μέσω της σχέσης

$$H(t) = \sqrt{EW(t) * NS(t)}$$
 όπου H είναι ο γεωμετρικός μέσος της συνιστώσας Βορρά-Νότου (NS) και της συνιστώσας Ανατολής-Δύσης (EW) για κάθε χρονική στιγμή t .
- Υπολογισμός του λόγου της οριζόντιας προς κατακόρυφη συνιστώσα για κάθε χρονικό παράθυρο και στη συνέχεια υπολογισμός του μέσου όρου όλων των παραθύρων από 0.2 έως 20 Hz με λογαριθμικό βήμα δειγματοληψίας εκατό σημείων.
- Παρουσίαση των αποτελεσμάτων σε τρία γραφήματα, της μέσης οριζόντιας προς την κατακόρυφη συνιστώσα, και επιμέρους της κάθε οριζόντιας με την κατακόρυφη. Στον οριζόντιο άξονα παρουσιάζεται η συχνότητα (0.2-20 Hz) και στον κατακόρυφο το πλάτος H/V .
- Αφαίρεση των χρονικών παραθύρων που δίνουν πολύ μεγάλα πλάτη στο λόγο οριζόντιας προς κατακόρυφη (π.χ. λόγω τοπικού κρουστικού θορύβου) ή που το μέγιστο που προκύπτει δεν συμφωνεί με τα αποτελέσματα από τα υπόλοιπα χρονικά παράθυρα και επανάληψη της επεξεργασίας χωρίς αυτά.

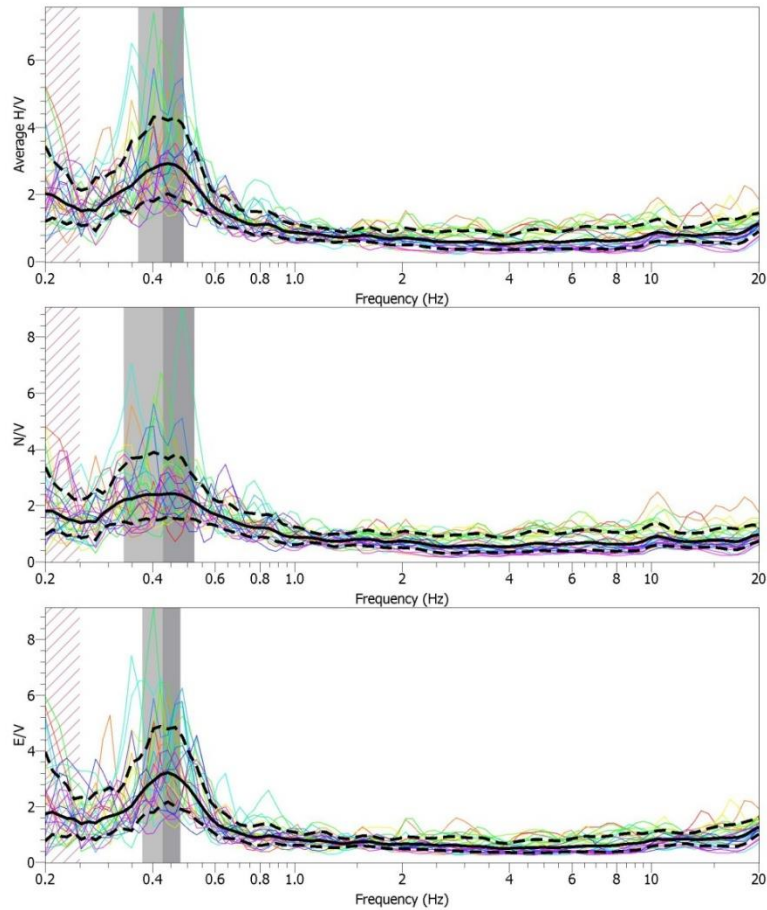
Στο σχήμα (13) φαίνεται η διαίρεση μιας καταγραφής μισής ώρας σε 45 παράθυρα των 40 δευτερολέπτων. Στο σχήμα (14) φαίνονται τα τελικά εναπομείναντα χρονικά παράθυρα στο τέλος αυτού του σταδίου της επεξεργασίας, μετά την αφαίρεση των παραθύρων που εμφανίζουν πρόβλημα θορύβου ή έντονες διαφορές. Τα χρονικά παράθυρα παρουσιάζονται με διαφορετικό χρώμα για να είναι πιο εύκολη η διάκριση τους στο επόμενο βήμα επεξεργασίας. Στο σχήμα (15) παρουσιάζονται ο λόγος της μέσης οριζόντιας προς την κατακόρυφη και οι δύο οριζόντιες συνιστώσες ως προς την κατακόρυφη, ενώ τέλος στο σχήμα (16) εμφανίζονται τα αντίστοιχα φάσματα ενέργειας των συνιστωσών που χρησιμοποιούνται.



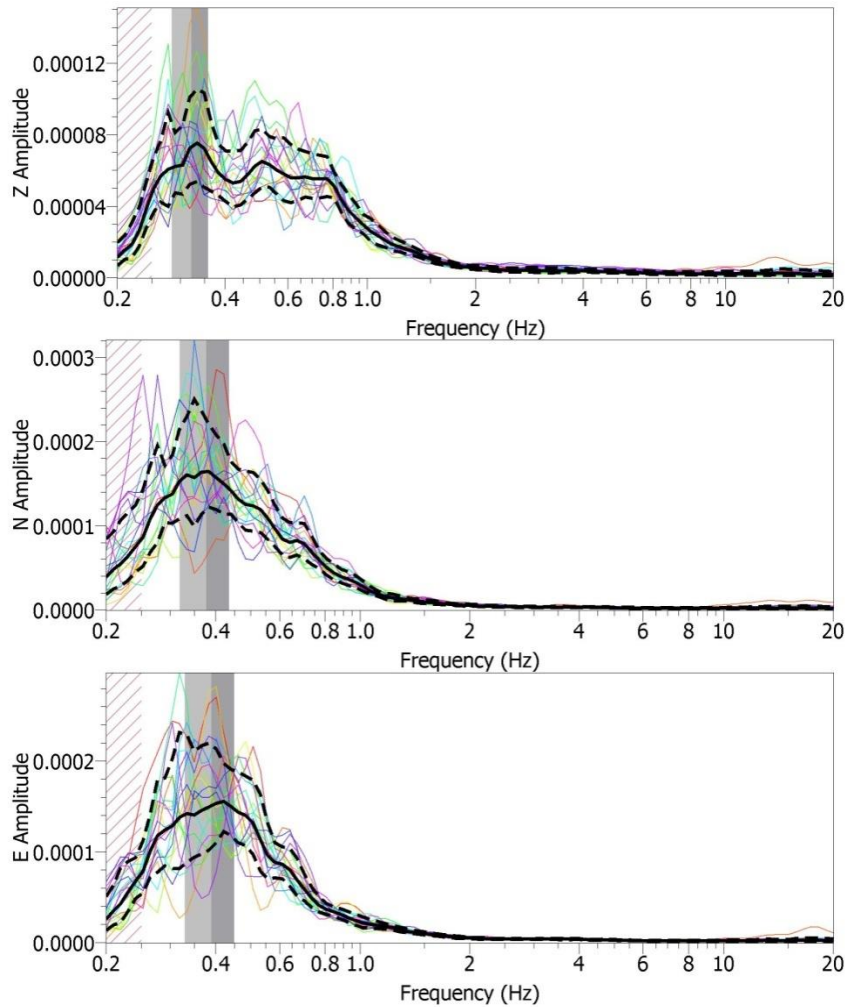
Σχήμα 13: Ενδεικτική καταγραφή εδαφικού θορύβου διάρκειας μισής ώρας και χωρισμός της σε χρονικά παράθυρα των 40 δευτερολέπτων, χωρίς αλληλοεπικάλυψη μεταξύ τους.



Σχήμα 14: Τελικός προσδιορισμός των χρονικών παραθύρων που επιλέχθηκαν από το σχήμα (Σχήμα 13) για να χρησιμοποιηθούν στην περαιτέρω επεξεργασία.



Σχήμα 15: Ενδεικτικό τελικό αποτέλεσμα επεξεργασίας της μέτρησης εδαφικού θορύβου του σχήματος (13). Στο πάνω σχήμα απεικονίζεται ο λόγος της οριζόντιας προς την κατακόρυφη συνιστώσα, στο μεσαίο ο λόγος της συνιστώσας Βορρά – Νότου προς την κατακόρυφη και στο κάτω ο λόγος συνιστώσας της Ανατολής – Δύσης προς την κατακόρυφη. Με γκρι χρώμα απεικονίζεται η αυτόματη επιλογή από το λογισμικό της θεμελιώδους συχνότητας εδαφικής ενίσχυσης. Τα διαφορετικά χρώματα αντιστοιχούν στα διαφορετικά χρονικά παράθυρα καταγραφής, όπως αυτά επιλέχθηκαν και φαίνονται στο σχήμα (17). Οι διακεκομμένες μαύρες γραμμές απεικονίζουν το εύρος ενός τυπικού σφάλματος ($\pm 1\sigma$) στον προσδιορισμό του φασματικού λόγου. Η γραμμοσκιασμένη περιοχή στο αριστερό τμήμα του σχήματος αντιστοιχεί στο εύρος συχνοτήτων μέσα στο οποίο οι κορυφές δεν θεωρούνται στατιστικά αξιόπιστες, λόγω της αρχικής επιλογής του χρονικού μήκους του παραθύρου (40 δευτερόλεπτα).



Σχήμα 16: Φάσματα ενέργειας από το μετασχηματισμό Fourier για κάθε συνιστώσα (πάνω κατακόρυφη, μέση Βορρά – Νότου, κάτω Ανατολής – Δύσης) του σχήματος (14). Τα σύμβολα που χρησιμοποιούνται περιγράφονται στο σχήμα (15)

3.2.4. Κριτήρια επιλογής της συχνότητας ενίσχυσης μέγιστου πλάτους

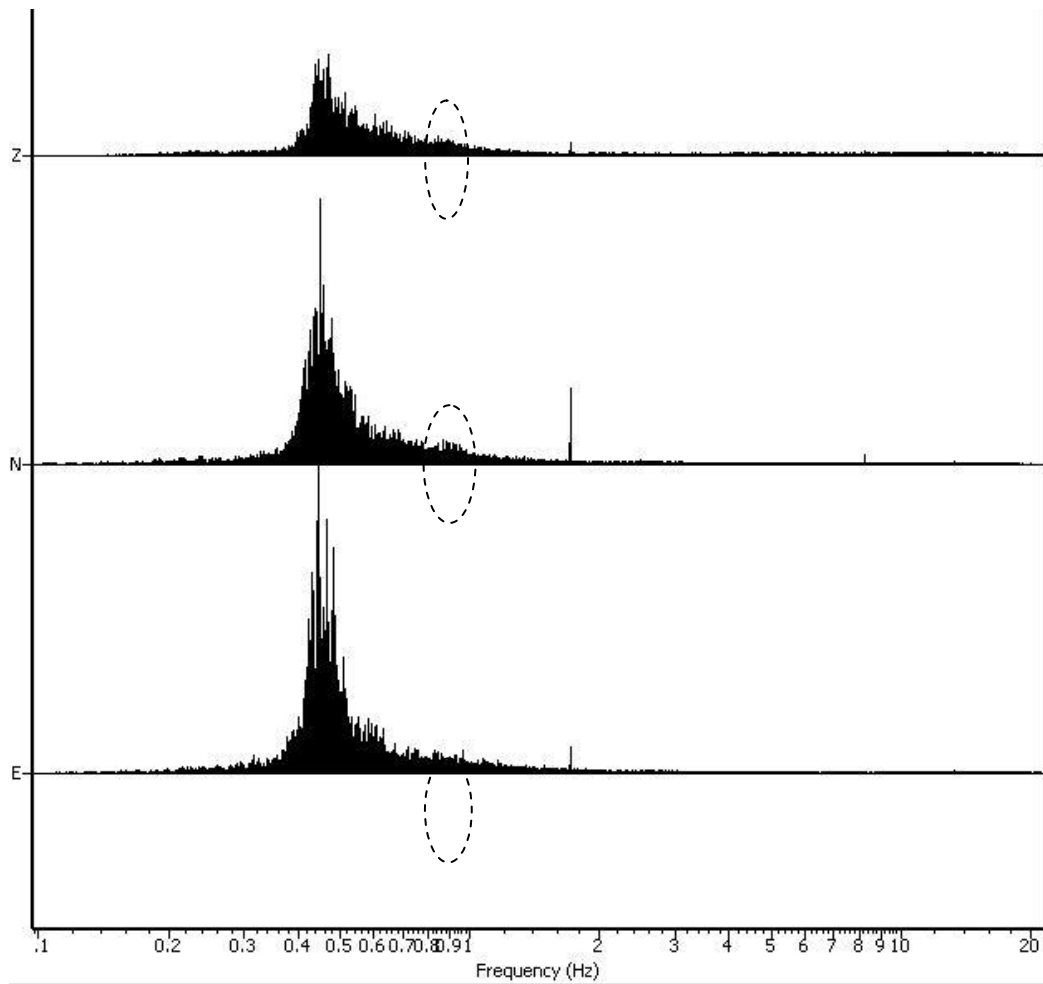
Μετά το πέρας της επεξεργασίας των καταγραφών, απομένει ο καθορισμός της συχνότητας που παρουσιάζεται το μέγιστο πλάτος του φασματικού λόγου. Σε περιπτώσεις μονοδιάστατων δομών, όπου εμφανίζεται ισχυρή αντίθεση μεταξύ των επιφανειακών σχηματισμών και του σεισμικού υποβάθρου, εμφανίζεται ένα μέγιστο και η επιλογή είναι σχετικά εύκολη. Σε περιπτώσεις δομών που εμφανίζουν δισδιάστατη ή τρισδιάστατη δομή εμφανίζονται συχνά περισσότερα του ενός μέγιστα. Σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει ισχυρή

αντίθεση ταχυτήτων μεταξύ των σχηματισμών εμφανίζεται σε κάποιες περιπτώσεις μέγιστο με διευρυμένο πλάτος, ή και δεν εμφανίζεται κάποιο μέγιστο. Στις δύο αυτές περιπτώσεις η επιλογή του μεγίστου γίνεται δυσκολότερη ή και αδύνατη.

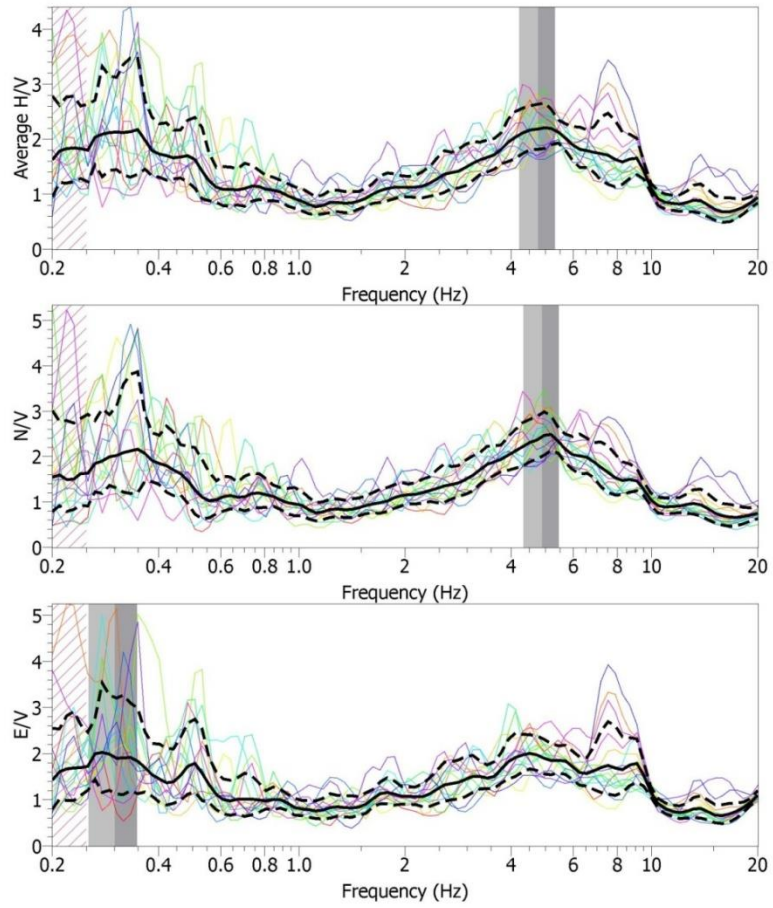
Στα πλαίσια του προγράμματος SESAME δημιουργήθηκε ένας «οδηγός» για τον καθορισμό της συχνότητας που εμφανίζει μέγιστο πλάτος H/V. Ο οδηγός αυτός παρέχει διάφορα κριτήρια που αν πληρούνται τότε η συχνότητα με το μέγιστο πλάτος φασματικού λόγου H/V μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια. Τα κριτήρια αυτά είναι αρκετά αυστηρά, χωρίς όμως να είναι δεσμευτικά, ειδικά σε περιπτώσεις πολυδιάστατων δομών. (Για περισσότερες λεπτομέρειες βλέπε παράρτημα Γ).

Στην παρούσα πτυχιακή ακολουθήθηκαν τα εξής κριτήρια επιλογής της συχνότητας με το μέγιστο πλάτος:

- Το πλάτος, A , της κορυφής θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο της τιμής 2. Σε περιπτώσεις που το πλάτος A είναι ελαφρώς μικρότερο τις τιμής 2 αλλά ικανοποιεί τα υπόλοιπα κριτήρια που τέθηκαν στα πλαίσια του SESAME τότε θεωρείται ότι αντικατοπτρίζει την θεμελιώδη συχνότητα. Στην παρούσα διατριβή το ελάχιστο πλάτος επιλογής ορίστηκε στα 1.7, κυρίως εξαιτίας του γεγονότος ότι στο σύνολο των μετρήσεων τα πλάτη του φασματικού λόγου H/V δεν είναι πολύ μεγάλα.
- Σε περίπτωση που εμφανίζονται άνω του ενός μεγίστου, τότε γίνεται έλεγχος του φάσματος ενέργειας, για να διαπιστωθεί η ύπαρξη ή μη ενέργειας που προέρχεται από ανθρωπογενή δραστηριότητα. Στην τελευταία περίπτωση συχνά παρατηρείται οξεία κορυφή στο φάσμα ενέργειας που διαφοροποιείται από το υπόλοιπο φάσμα. Ένα τέτοιο παράδειγμα παρουσιάζεται στο σχήμα (18), όπου υπάρχει οξύ μέγιστο στο φάσμα ενέργειας στα 1.71 Hz, με αντίστοιχο μέγιστο στο λόγο οριζόντιας προς κατακόρυφη συνιστώσα. Αυτή η ενέργεια προέρχεται από τη λειτουργία του υποσταθμού της Δ.Ε.Η. στην περιοχή, όπως παρουσιάζεται αναλυτικά παρακάτω.
- Στην περίπτωση πολλαπλών κορυφών, η κορυφή μεγάλου πλάτους που αντιστοιχεί στη χαμηλότερη συχνότητα ορίζει τη θεμελιώδη συχνότητα του συνόλου των ανώτερων επιφανειακών σχηματισμών, που εμφανίζουν σεισμική αντίθεση με το σεισμικό βραχώδες υπόβαθρο. Καθώς αυξάνεται η συχνότητα, η δεύτερη συχνότητα που εμφανίζει μεγάλο πλάτος αντιστοιχεί ενδεχομένως σε ανώτερους επιφανειακούς σχηματισμούς που εμφανίζουν σεισμική ασυνέχεια με τους υποκείμενους τους. Μια εναλλακτική εξήγηση της ύπαρξης δεύτερης κορυφής μεγάλου πλάτους σε υψηλότερη συχνότητα μπορεί να αποδοθεί σε ανώτερες αρμονικές, όπως π.χ. παρουσιάζεται στα σχήματα (2.9) και (2.10), ή ακόμα και σε φαινόμενα δύο και τριών διαστάσεων της υπεδάφειας δομής. Στο σχήμα (2.19) παρουσιάζεται ένα τυπικό παράδειγμα καταγραφής όπου εμφανίζονται 2 κορυφές στο φασματικό λόγο H/V . Η κορυφή στη χαμηλή συχνότητα (0.3 Hz) αντιστοιχεί στην αντίθεση του συνόλου των επιφανειακών ιζηματογενών σχηματισμών με το βραχώδες υπόβαθρο, ενώ η κορυφή στα 4.8 Hz, όπως θα παρουσιαστεί στη συνέχεια, στην αντίθεση ταχύτητας των ανώτερων επιφανειακών Τεταρτογενών σχηματισμών με τους υποκείμενους Νεογενείς σχηματισμούς. Αξίζει να σημειωθεί ότι το λογισμικό επιλέγει αυτόματα ανά συνιστώσα την θεμελιώδη συχνότητα με κριτήριο το μέγιστο πλάτος. Στο παράδειγμα του σχήματος (2.19) η επιλογή ανά οριζόντια συνιστώσα είναι διαφορετική, ακριβώς εξαιτίας της ύπαρξης δύο συχνοτήτων ενίσχυσης.



Σχήμα 17: Φάσμα ενέργειας εδαφικού θορύβου. Στη συχνότητα των 1.71 Hz παρατηρείται οξεία κορυφή, η οποία αποδόθηκε σε μηχανικό θόρυβο λόγω της λειτουργίας παρακείμενου υποσταθμού της Δ.Ε.Η..



Σχήμα 18: Παράδειγμα καταγραφής που εμφανίζει δύο συχνότητες ενίσχυσης. Τα σύμβολα του σχήματος περιγράφονται στο σχήμα 15.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ



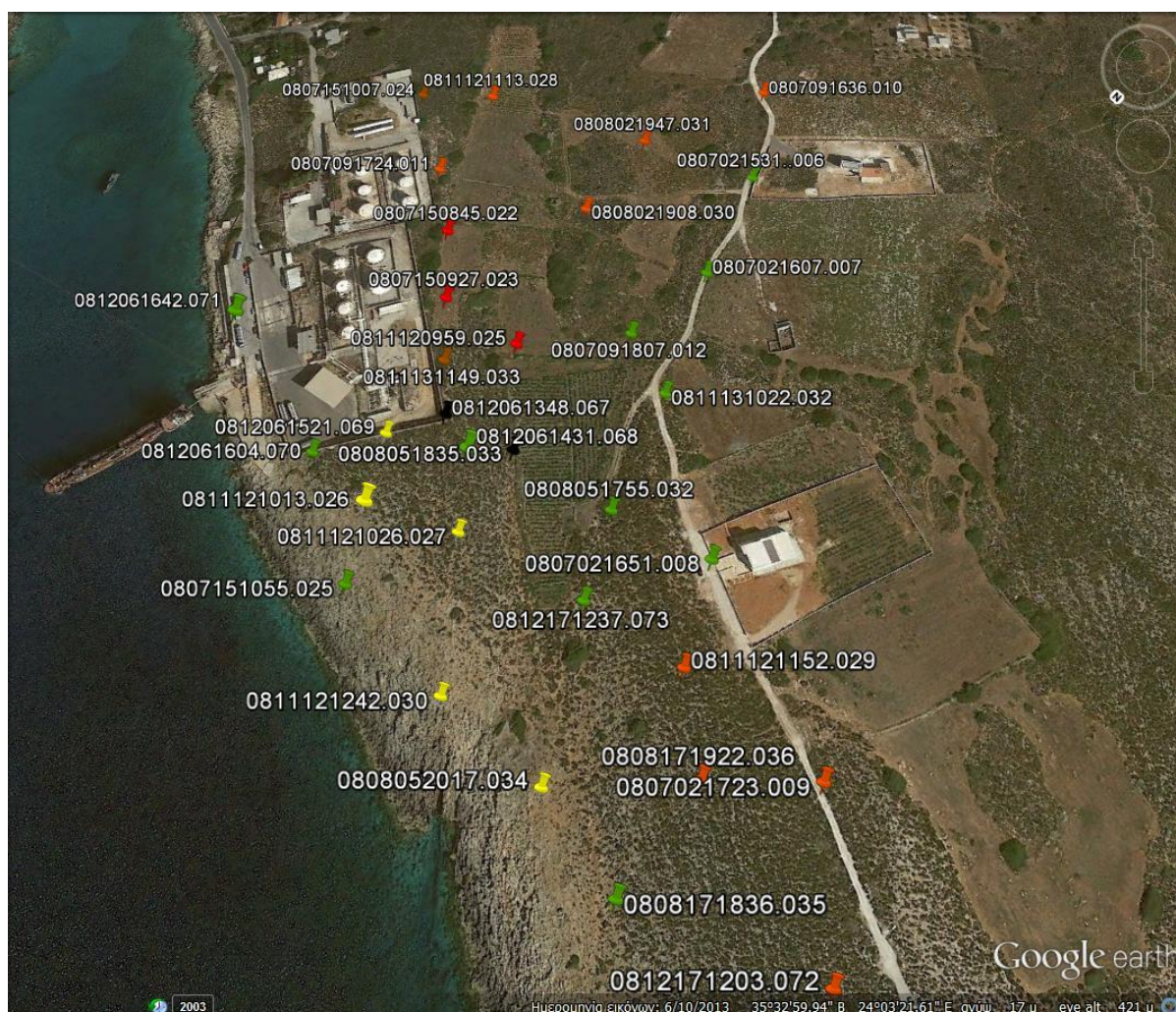
Σύμφωνα με τα παραπάνω, για κάθε μια καταγραφή προσδιορίστηκε η χαμηλότερη συχνότητα με το μεγαλύτερο πλάτος, ως η συχνότητα που αντιπροσωπεύει τη θεμελιώδη συχνότητα των ανώτερων εδαφικών σχηματισμών που βρίσκονται πάνω από το βραχώδες υπόβαθρο. Το σύνολο των αποτελεσμάτων των μετρήσεων εδαφικού θορύβου έχει τοποθετηθεί στο παράρτημα.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα συχνότητας – πλάτους, τα οποία απεικονίζονται σε χάρτες του Google Earth, με σκοπό τη χωρική απεικόνιση τους σε θεματικούς χάρτες συχνότητας και πλάτους. Στα σχήματα απεικονίζονται οι θέσεις των μετρήσεων, καθώς και ο χρωματικός χάρτης της (θεμελιώδους) ιδιοσυχνότητας για όλη την περιοχή ενδιαφέροντος και το αντίστοιχο πλάτος ενίσχυσης για τις συχνότητες αυτές.

Στο πρώτο σχήμα απεικονίζονται το εύρος των συχνοτήτων σε αντιστοιχία χρώματος ως εξής:

0,200-0,299	Κίτρινο
-------------	---------

0,300-0,399	Κόκκινο
0,700-0,799	Μαύρο
0,800-0,899	Πράσινο
0,900-0,999	Πορτοκαλί
1,000-1,100	Καφέ

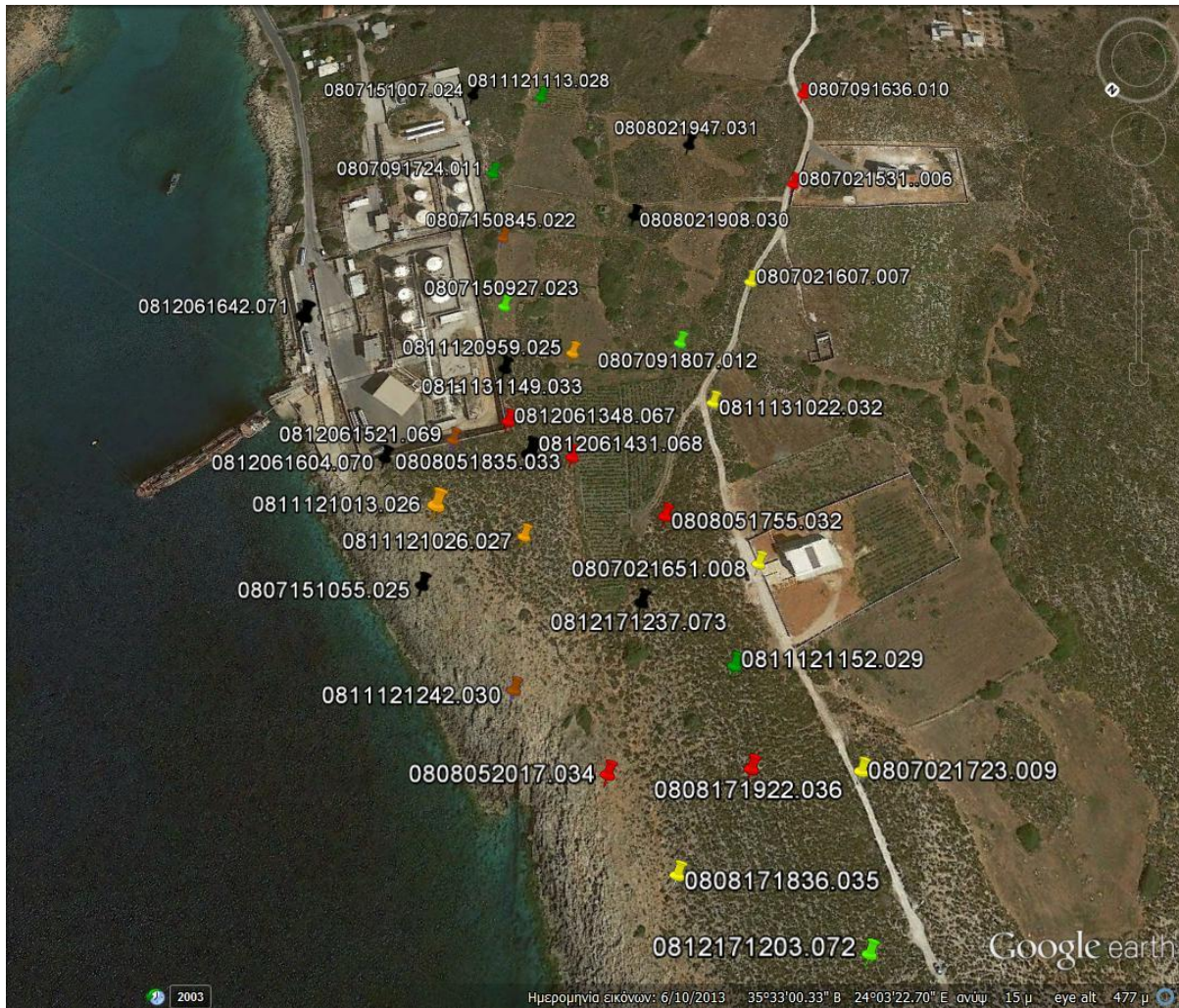


Εικόνα 5 Χρωματικός χάρτης ιδιοσυχνότητας

Στη δεύτερη απεικόνιση η αντιστοιχία χρώματος- πλάτους ενίσχυσης του φασματικού λόγου Η/Υ ορίζεται ως εξής:

2,500-2,799	Κίτρινο
2,800-3,099	Κόκκινο
3,100-3,399	Μαύρο
3,400-3,699	Πράσινο Σκούρο

3,700-4,599	Πράσινο Ανοικτό
7,100-8,599	Πορτοκαλί
15,000-37,000	Καφέ



Εικόνα 6 Χρωματικός χάρτης Πλάτους Ενίσχυσης για τις ιδιοσυχνότητες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΕΚΤΕΝΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

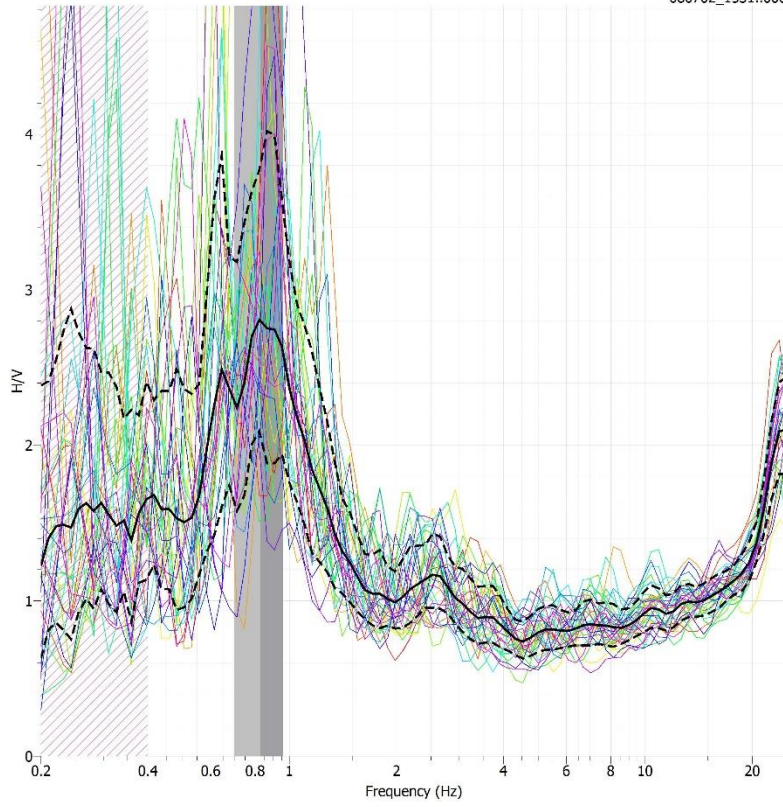
Μετά από συμφωνία μεταξύ της Shell Hellas A.E. και του Εργαστηρίου Γεωφυσικής και Σεισμολογίας του Τ.Ε.Ι. Κρήτης, τα αποτελέσματα και συμπεράσματα της παρούσας πτυχιακής έχουν κριθεί μερικώς απόρρητα. Το πλήρες κείμενο έχει παραδοθεί στους υπεύθυνους της Shell Hellas A.E. και είναι στη διάθεση του οποιοδήποτε ενδιαφερομένου μετά από επικοινωνία με τη συγγραφέα της πτυχιακής, Γεωργία Πέγγα, και τον υπεύθυνο καθηγητή, Ηλία Παπαδόπουλο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

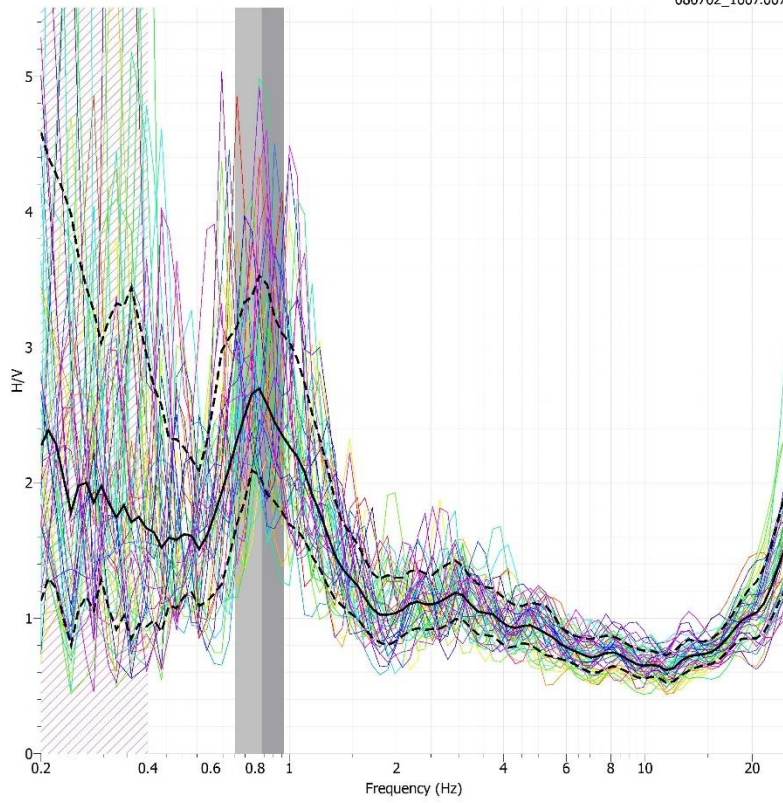
1. Λέκκας Ευθ., 2000, Φυσικές και τεχνολογικές καταστροφές, Εκδ. ACCESS Pre-press.
2. Παπαδόπουλος Γ., 2000, Η Πολιτική Προστασία στην Ελλάδα, Αντιμετώπιση Φυσικών και Τεχνολογικών Καταστροφών, Εκδόσεις ΙΩΝ.
3. Μουντράκης Δημ., 1985, Γεωλογία της Ελλάδας, Εκδ. University Studio Press.
4. Stacy Young, Lina Balluz, Josephine Malilay, Natural and technologic hazardous material releases during and after natural disasters: a review. Science of the Total Environment (322) 2004.
5. E. Salzano, I. Iervolino, G. Fabbrocino, 2003, Seismic risk of atmospheric storage tanks in the frame work of quantitative risk analysis. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 16 (403-409).
6. G. Fabbrocino, I. Iervolino, F. Orlando, E. Salzano, 2005, Quantitive risk analysis of oil storage facilities in seismic areas. Journal of Hazardous Materials A123 (61-69).
7. T.K. Datta, 1999, Seismic response of buried pipelines: a state-of-the-art review, Nuclear Engineering and Design 192 (271-284).
8. Πανεπιστήμιο Πάτρας, Τμήμα Γεωλογίας Σημειώσεις Εργαστηρίου Σεισμολογίας. Διαθέσιμο από: seismo.geology.upatras.gr/engseismo/6_EngSeism_Epikindinotita.pdf
9. Παπαδόπουλος Η., 2013, Πειραματική και θεωρητική μελέτη της τοπικής εδαφικής ενίσχυσης με τη χρήση δεδομένων μικροθορύβου και γεωφυσικών μετρήσεων πεδίου.
10. Γεωλογικοί χάρτες από ΙΤΕ, Ινστιτούτο Μεσογειακών Σπουδών.
<http://hyperion.ims.forth.gr/maps/DigiArchaeoGeology.aspx>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

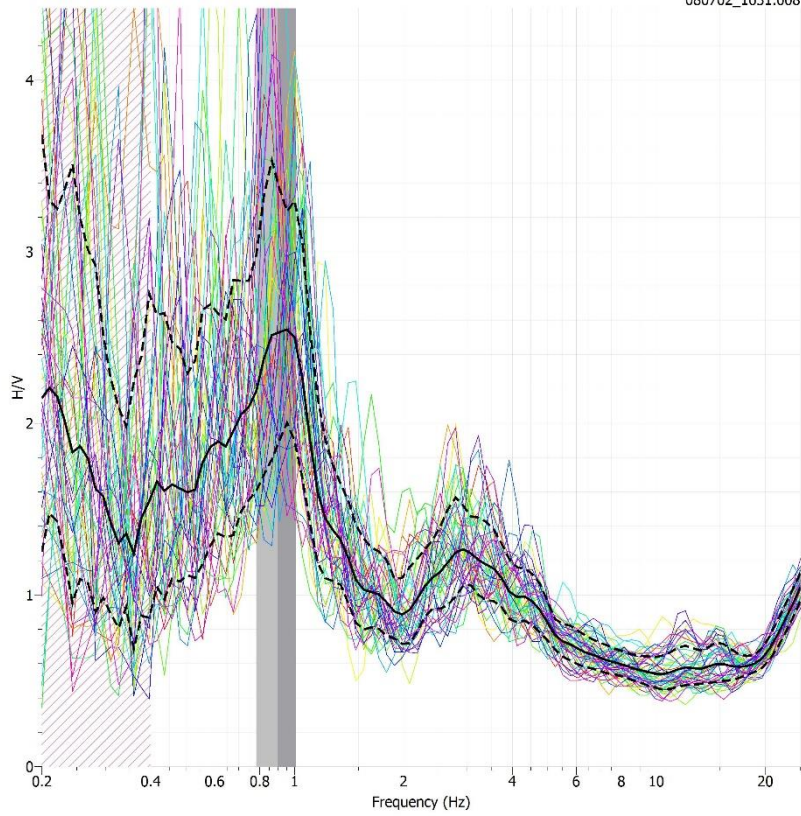
080702_1531.006



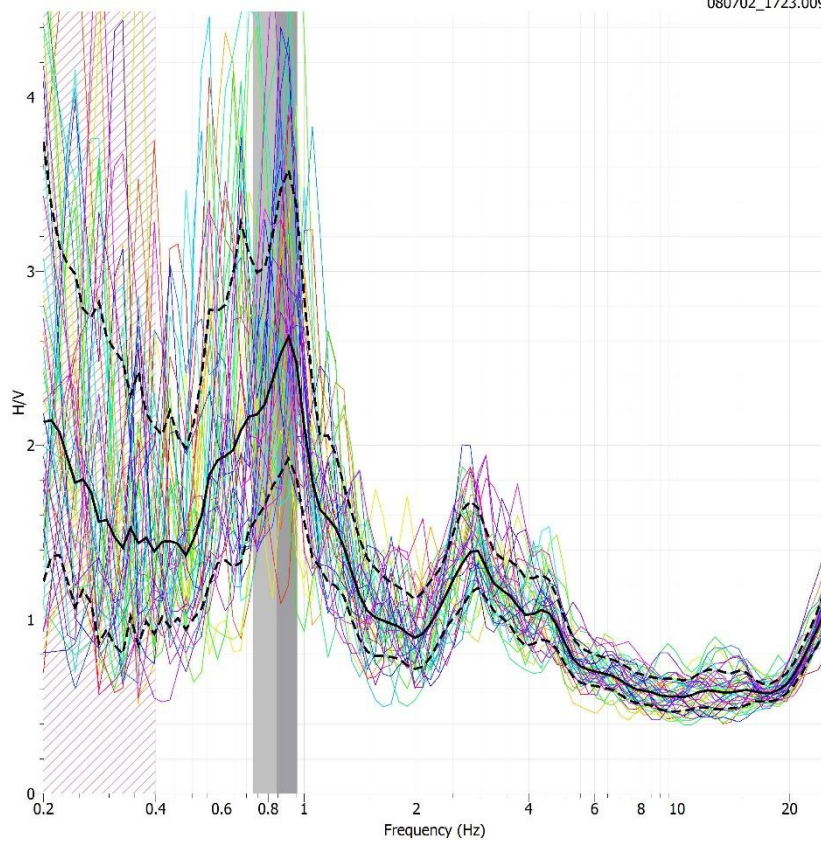
080702_1607.007



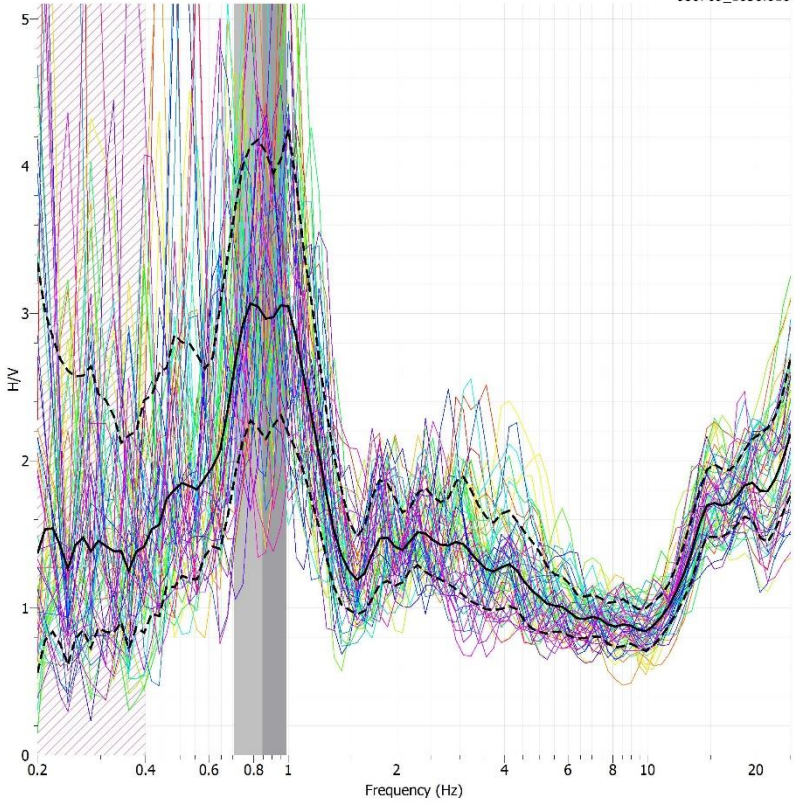
080702_1651.008



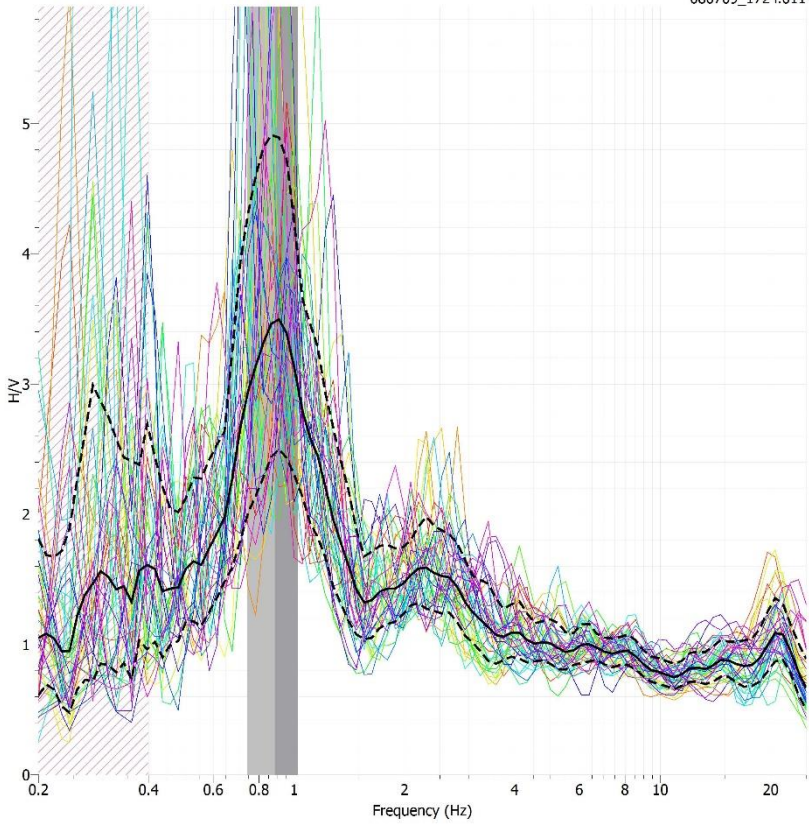
080702_1723.009



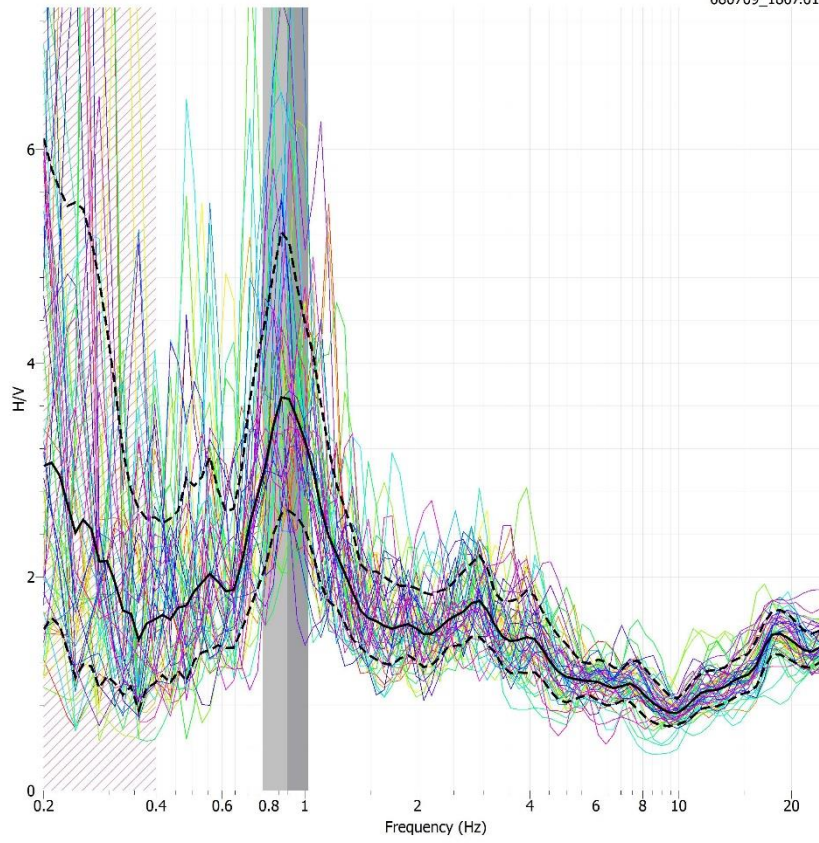
080709_1636.010



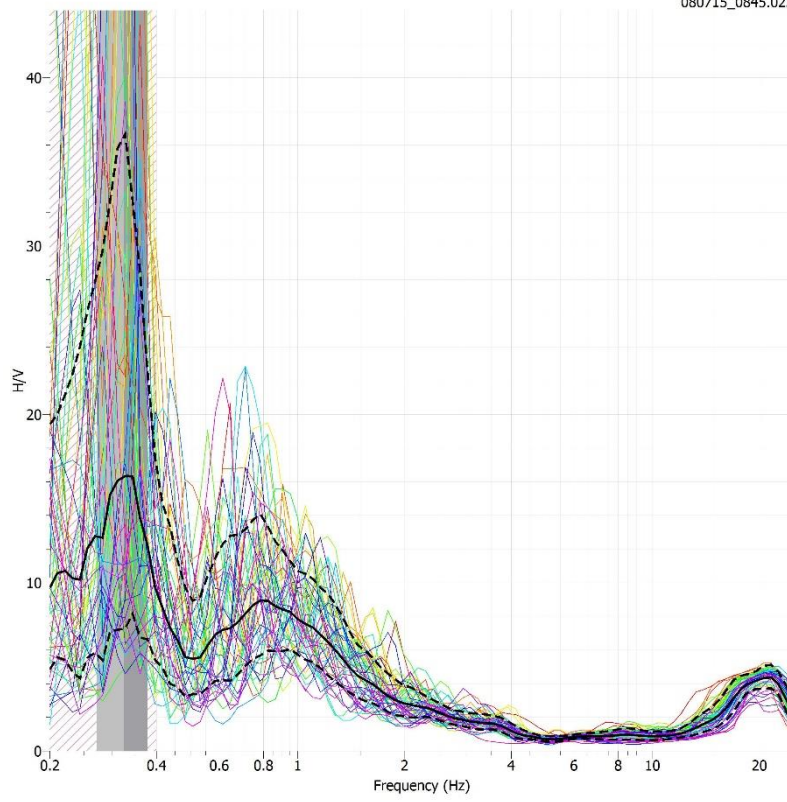
080709_1724.011



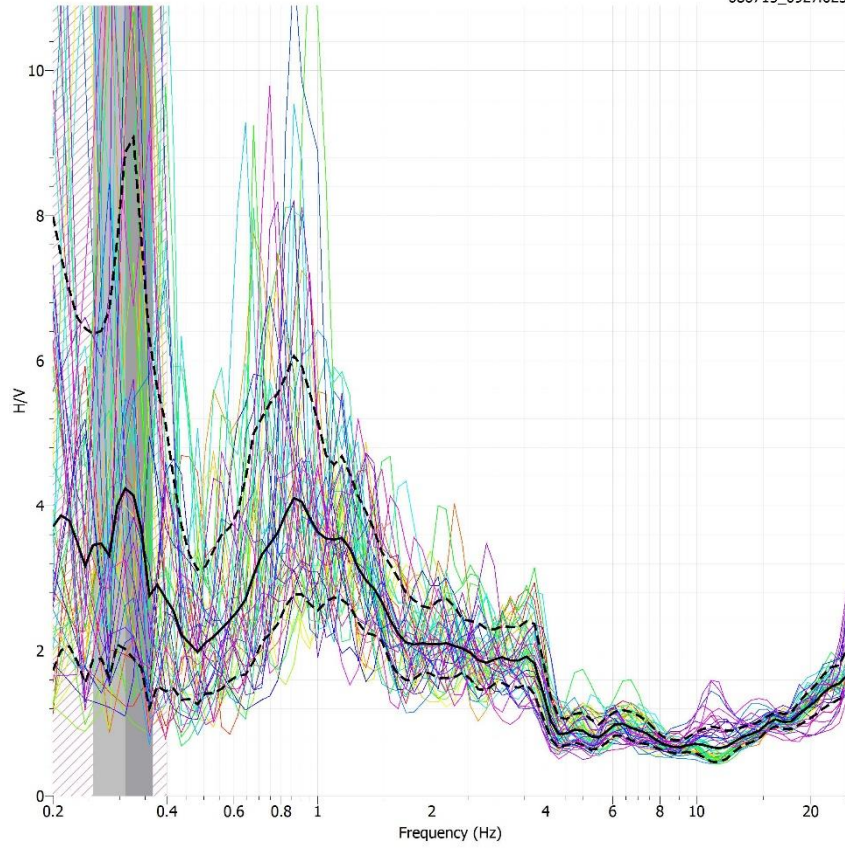
080709_1807.012



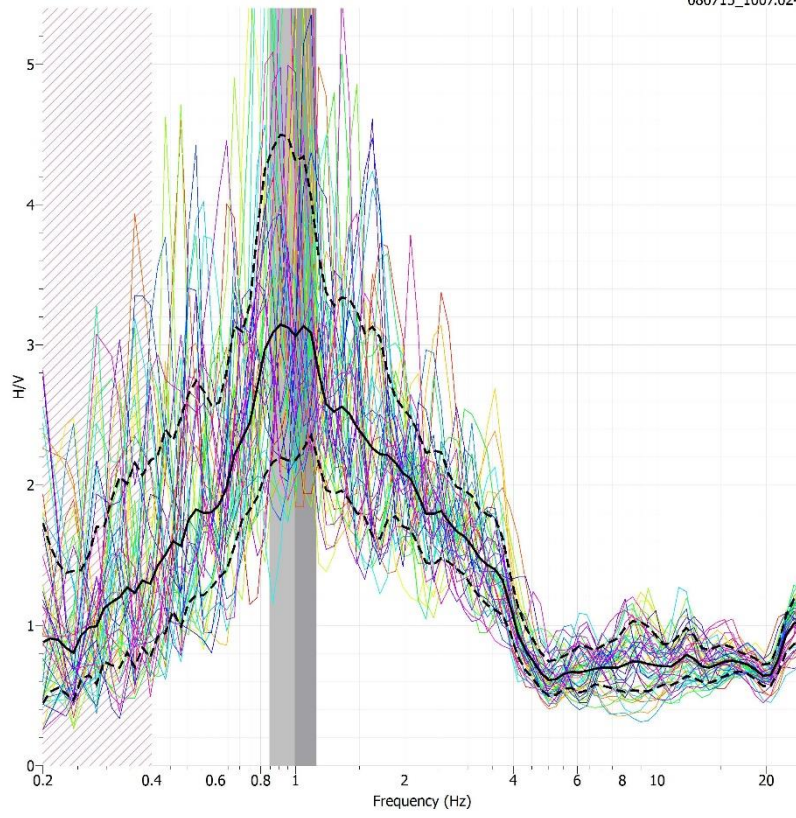
080715_0845.022



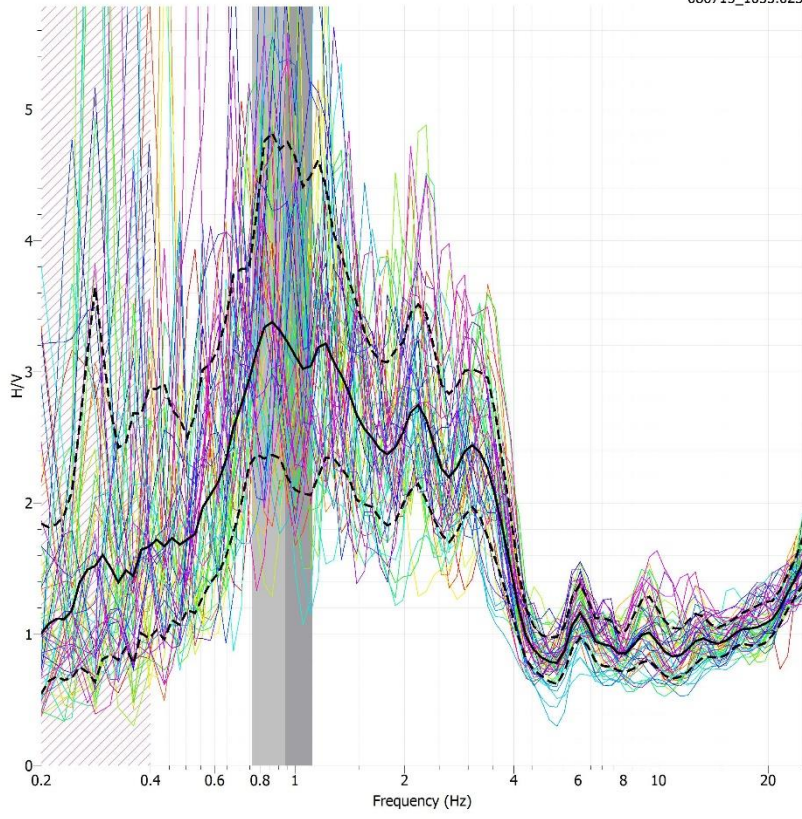
080715_0927.023



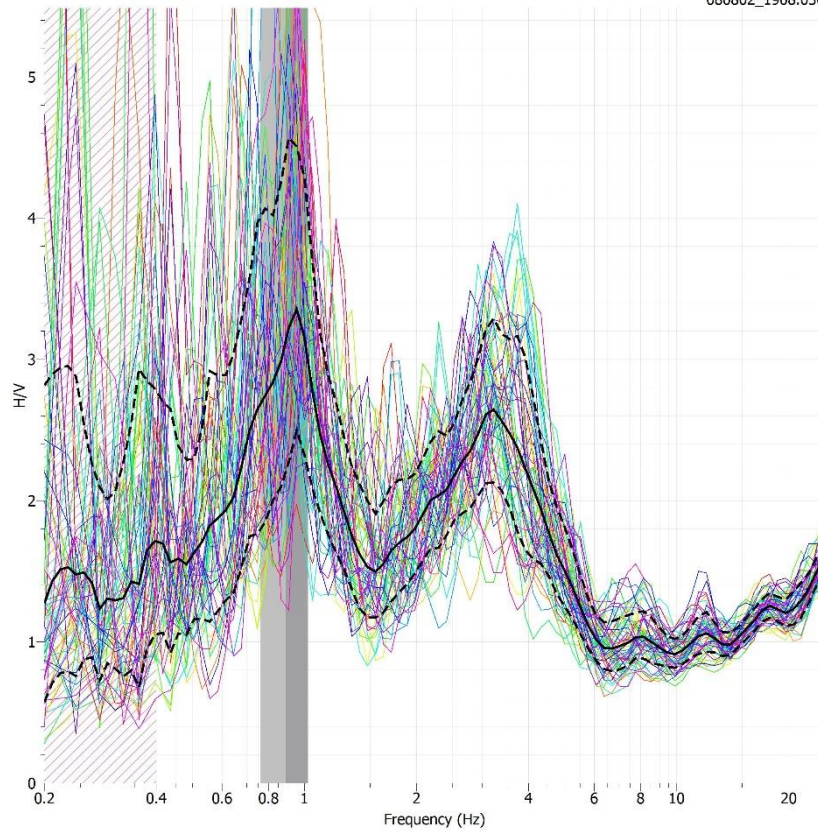
080715_1007.024



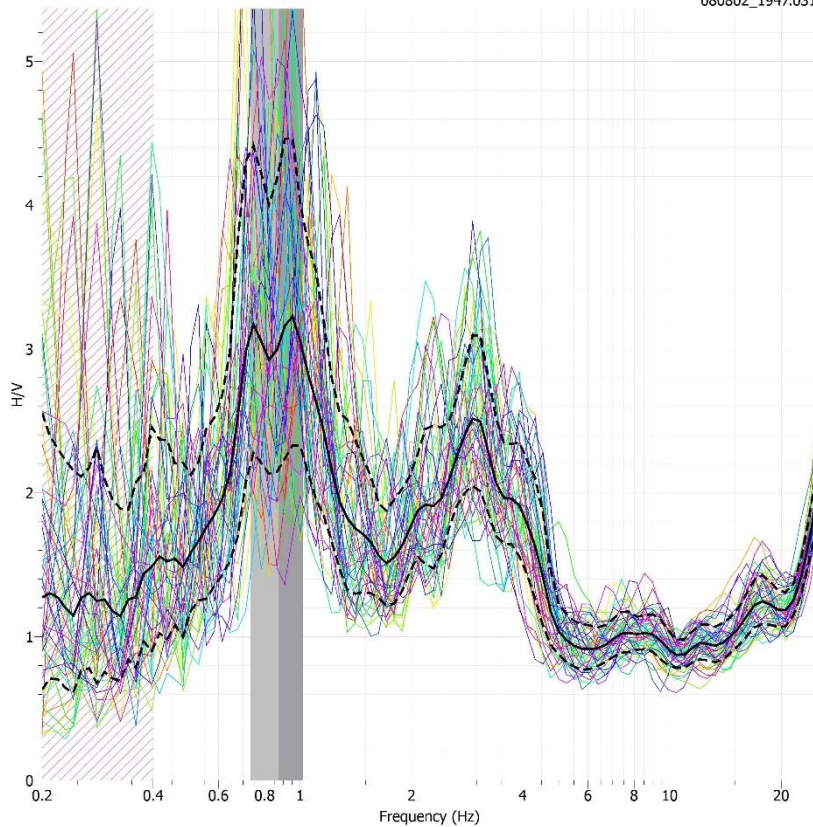
080715_1055.025



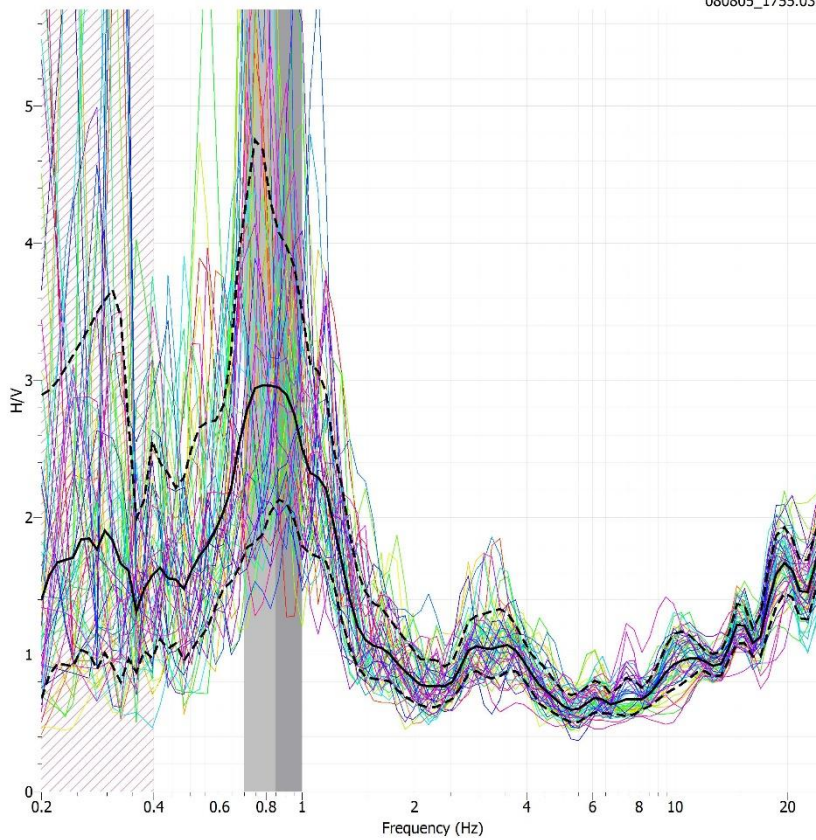
080802_1908.030



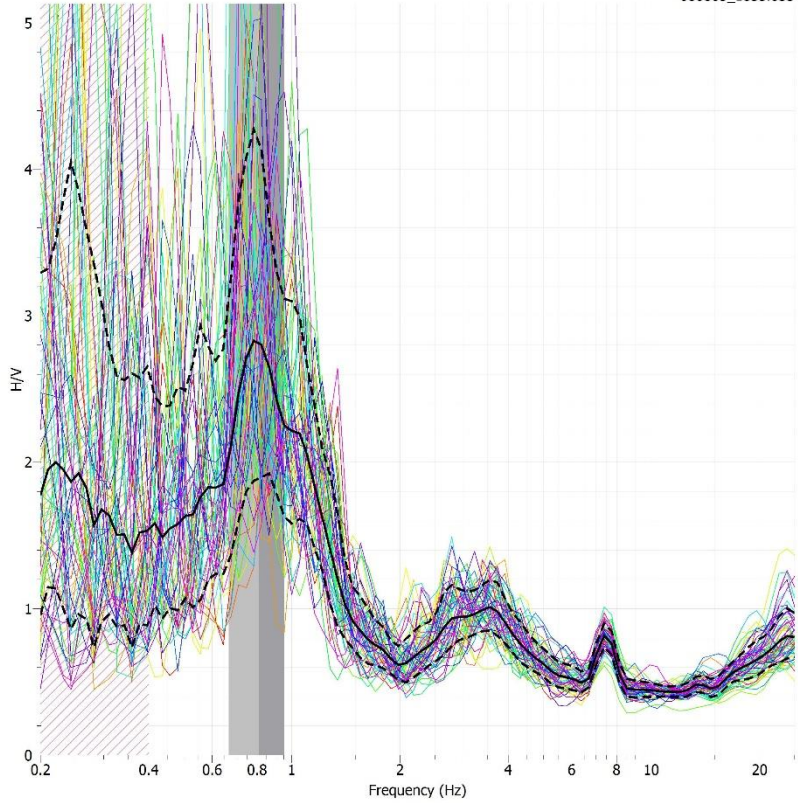
080802_1947.031



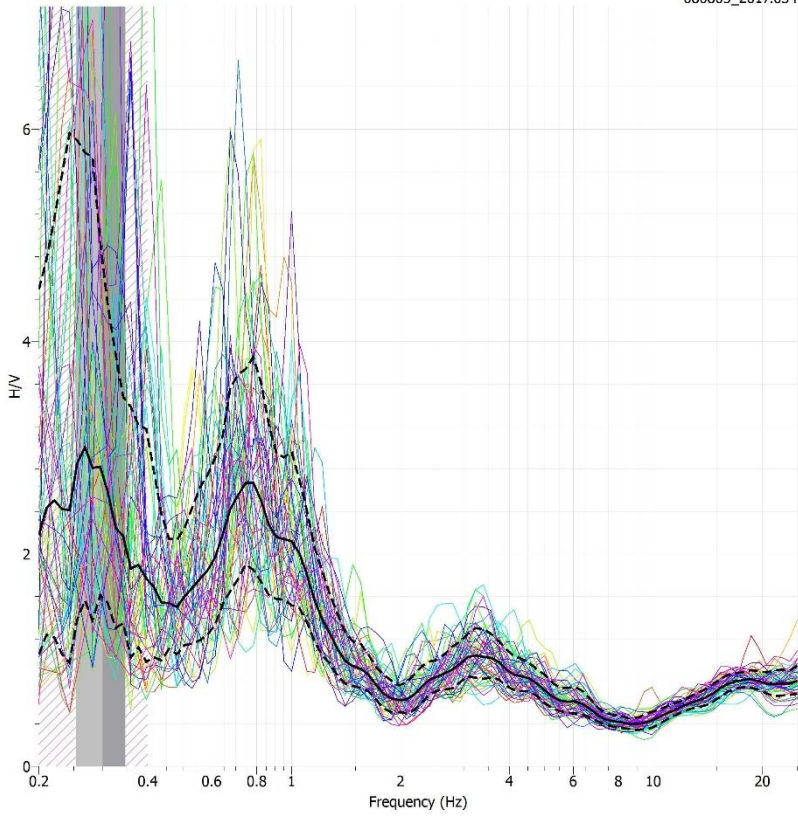
080805_1755.032



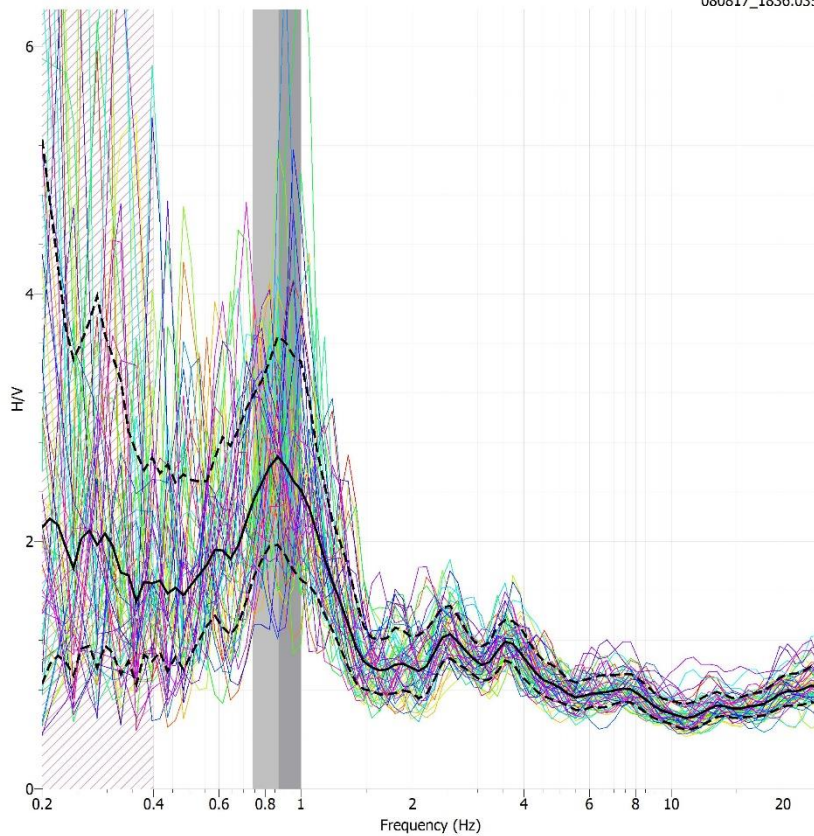
080805_1835.033



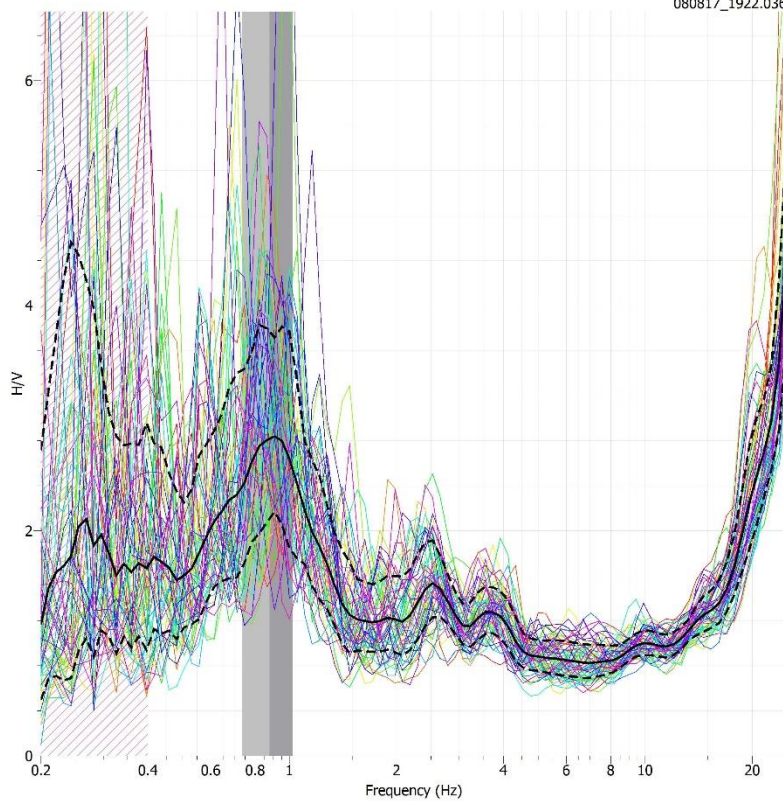
080805_2017.034



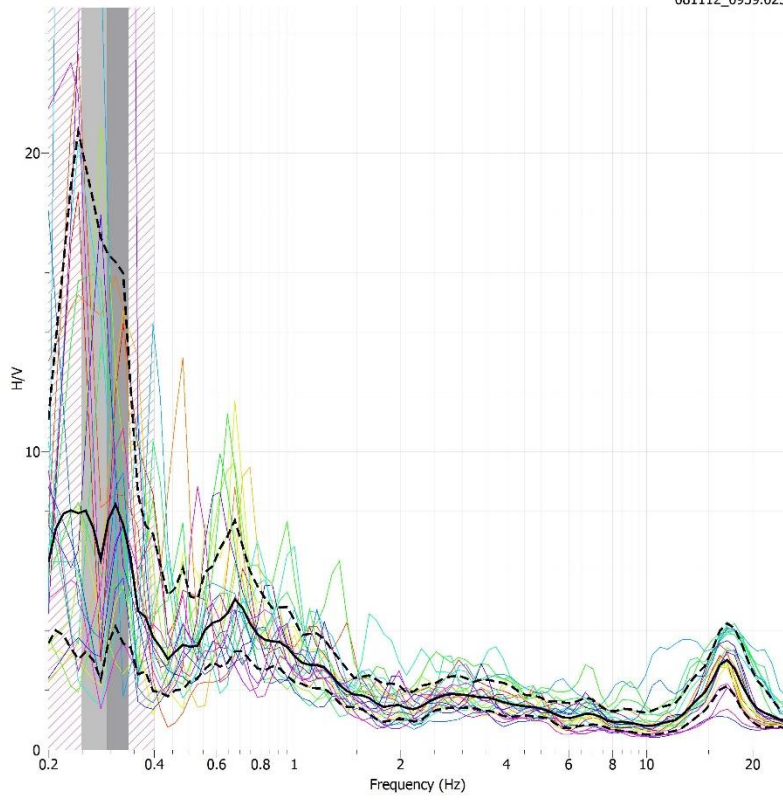
080817_1836.035



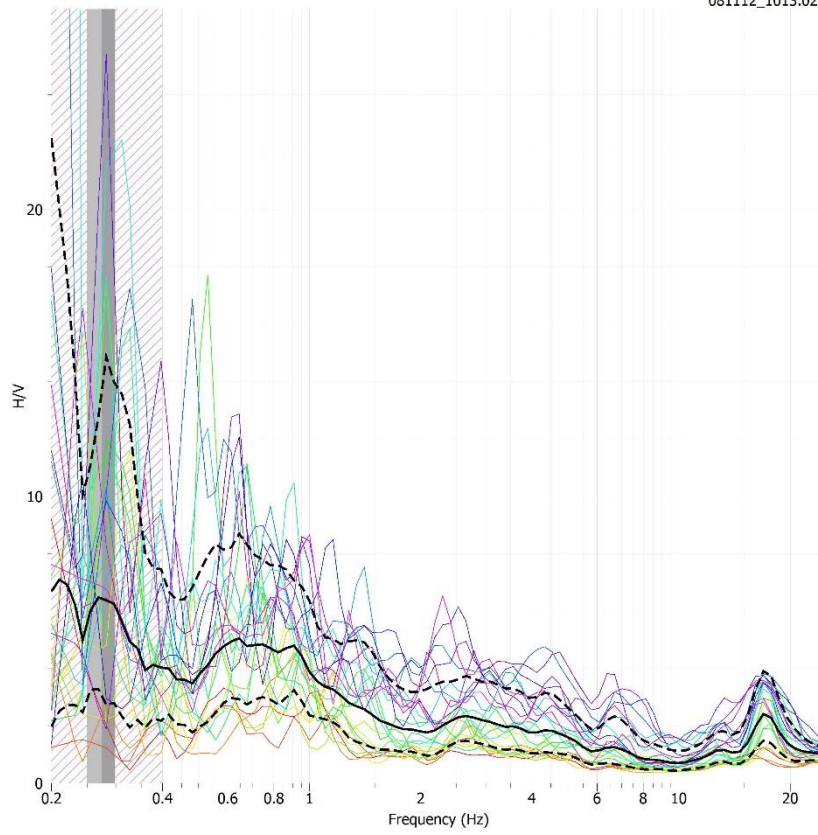
080817_1922.036



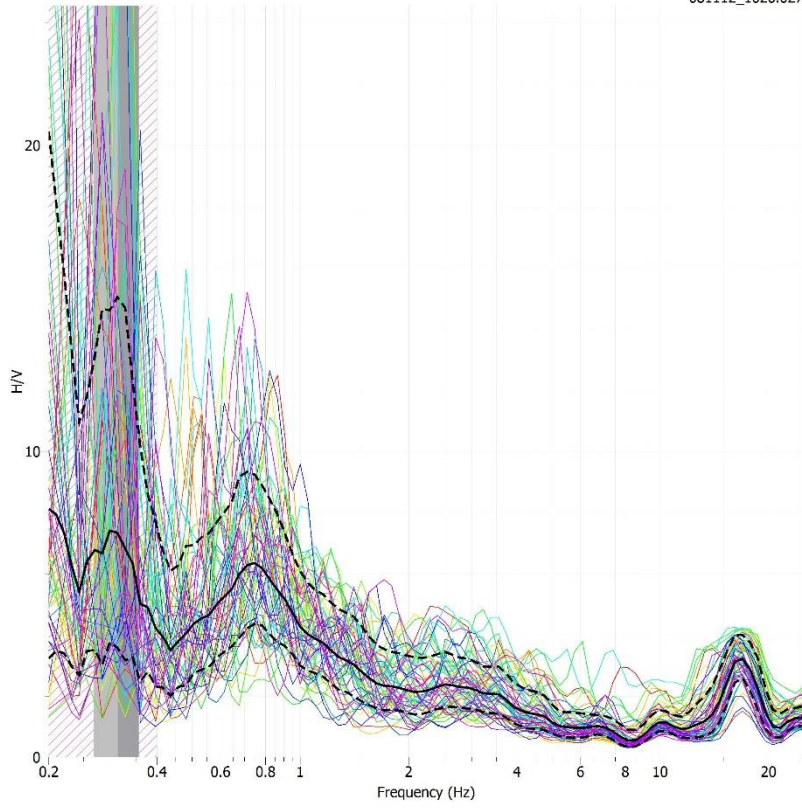
081112_0959.025



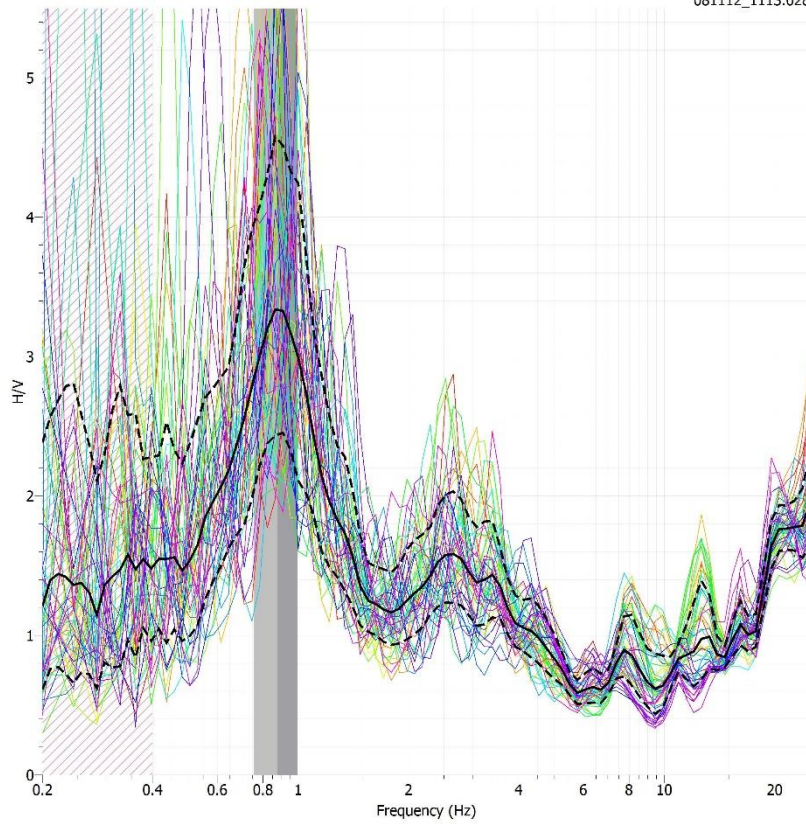
081112_1013.026



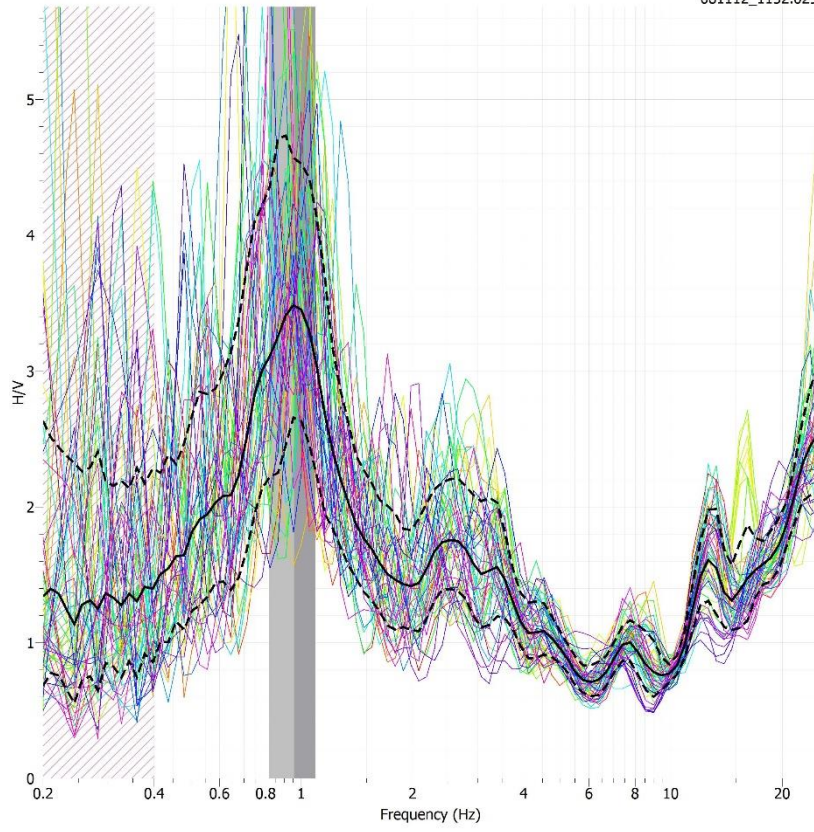
081112_1026.027



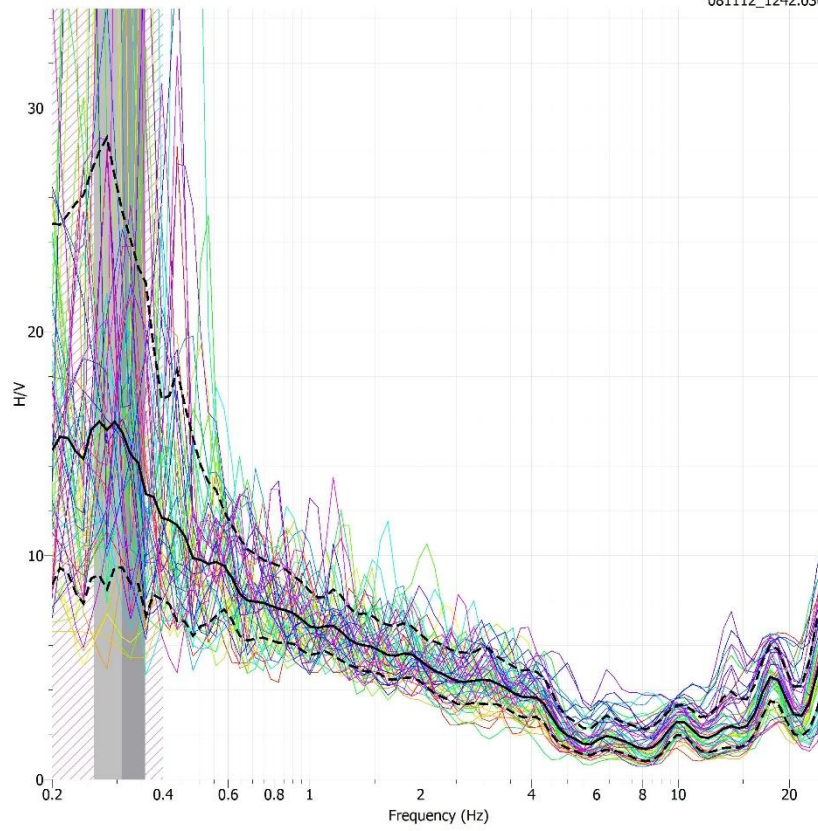
081112_1113.028



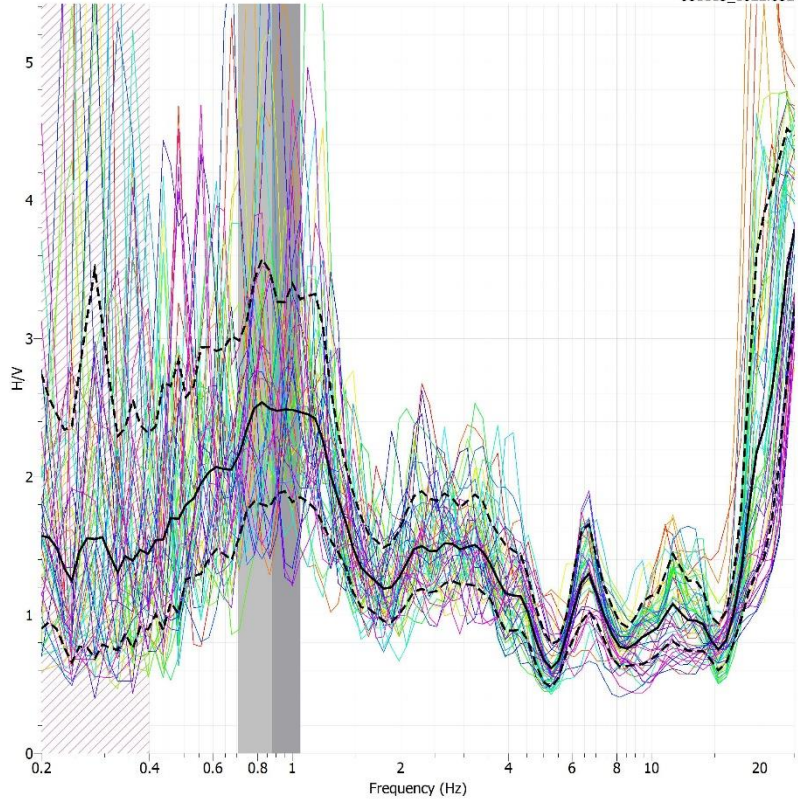
081112_1152.029



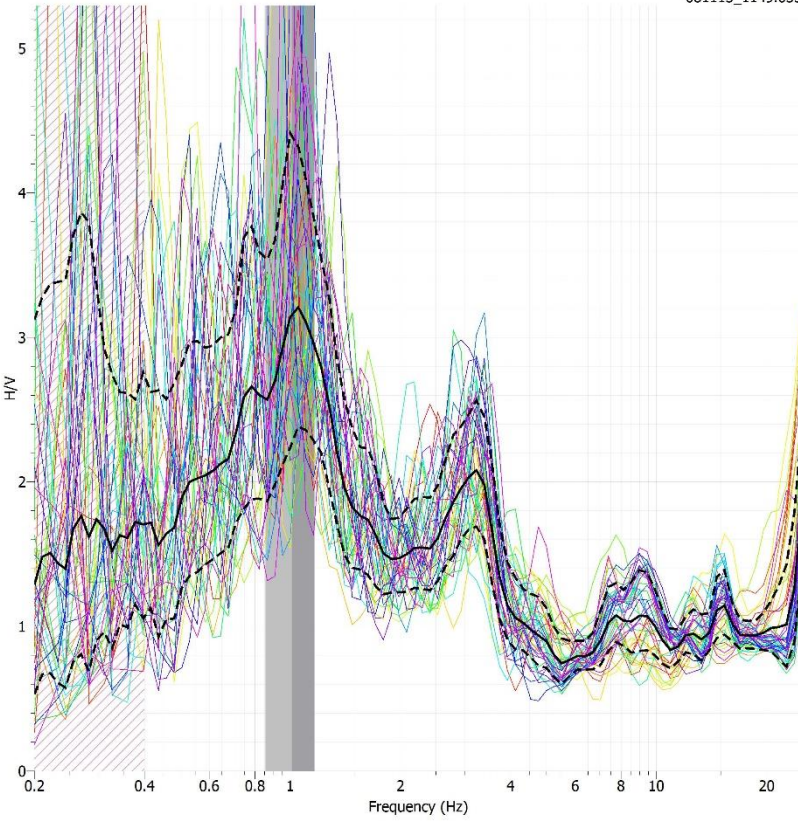
081112_1242.030



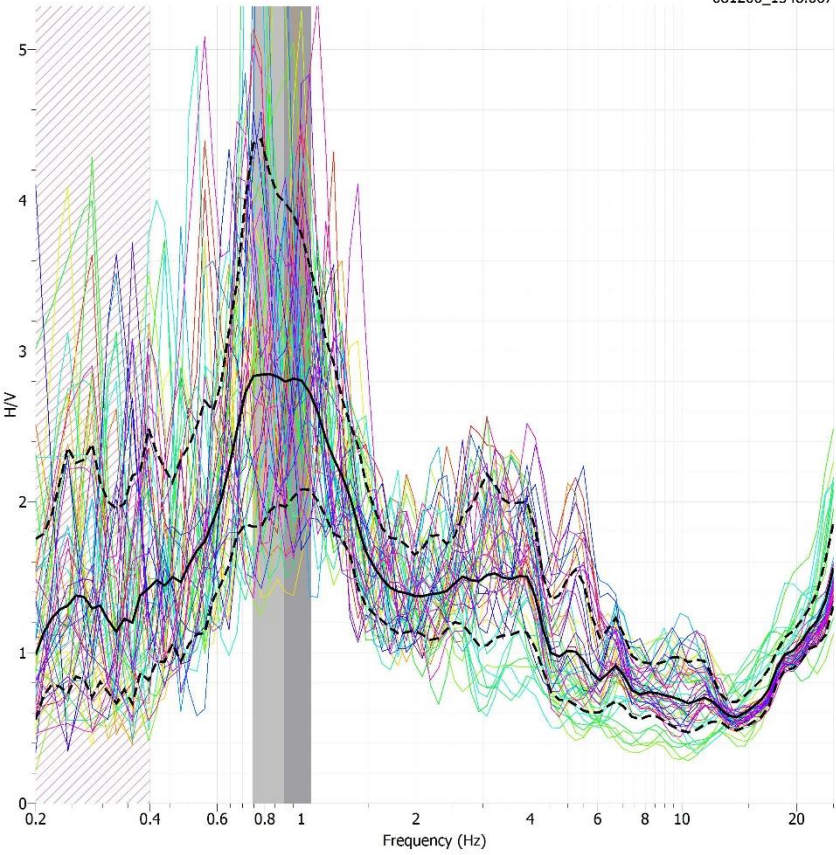
081113_1022.032



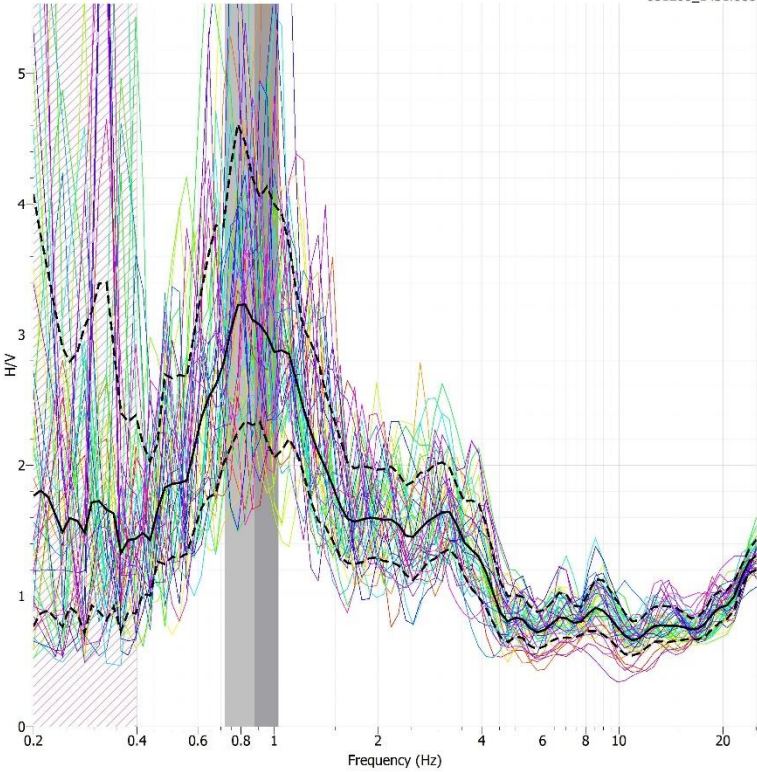
081113_1149.033



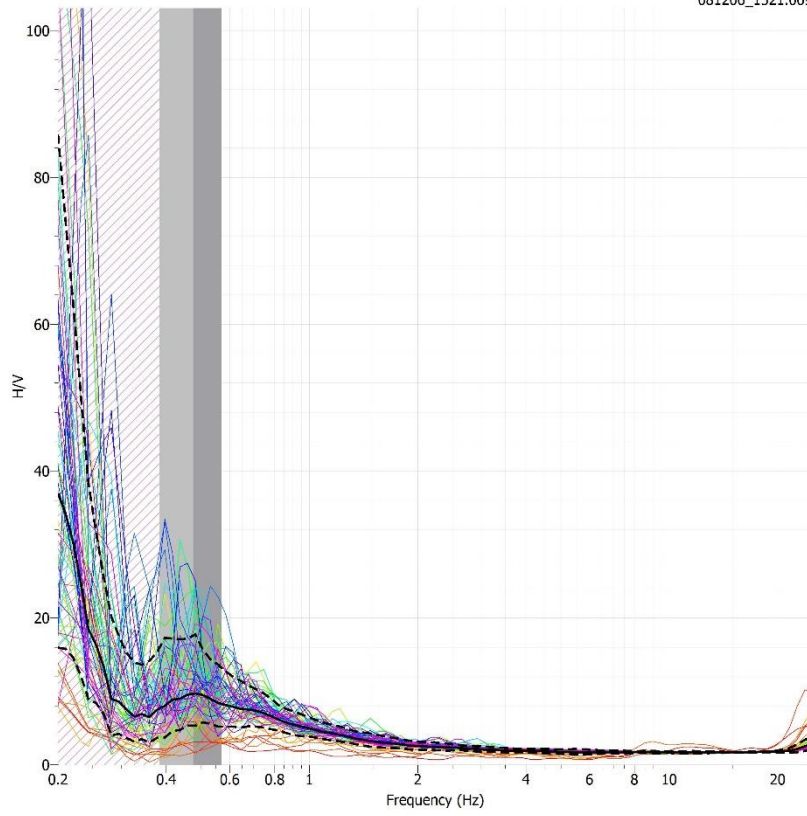
081206_1348.067



081206_1431.068



081206_1521.069



081206_1604.070

