



## Doctoral Thesis

# **Characterization of ambient ground-motion using spectral analysis techniques**

## **Numerical modeling, data processing and application to low-frequency passive seismic**

**Author(s):**

Lambert, Marc-André

**Publication Date:**

2010

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-006288745> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

**CHARACTERIZATION OF AMBIENT GROUND-MOTION USING  
SPECTRAL ANALYSIS TECHNIQUES - NUMERICAL MODELING,  
DATA PROCESSING AND APPLICATION TO LOW-FREQUENCY  
PASSIVE SEISMIC**

A dissertation submitted to  
ETH ZURICH

for the degree of  
Doctor of Sciences

presented by  
**MARC-ANDRÉ LAMBERT**  
Dipl. Natw. ETH Zurich

born 27<sup>th</sup> November 1976

citizen of  
Vernier (GE)

Accepted on the recommendation of

|                                |                          |             |
|--------------------------------|--------------------------|-------------|
| Prof. Dr. Jean-Pierre Burg     | ETH Zurich               | examiner    |
| Prof. Dr. Stefan M. Schmalholz | University of Lausanne   | co-examiner |
| Prof. Dr. Serge Shapiro        | Freie Universität Berlin | co-examiner |
| PD Dr. Erik H. Saenger         | ETH Zurich               | co-examiner |

# Abstract

The omnipresent ambient seismic wave-field at the Earth's surface is a superposition of waves generated by surface and subsurface seismic sources and it is permanently modified by the interaction with subsurface structures. Passive recordings of the ambient ground-motion therefore contain valuable information on underground structures and processes.

Travel-time based seismic methods are not directly applicable to extract such information because distinct events, such as earthquakes or hammer blows, are usually absent in the quasi-stationary ambient ground-motion. Instead, temporally stable wave-field patterns in frequency and space can be used to learn about the subsurface. Such spectral analysis methods have the potential to provide information on vertical inhomogeneities, such as horizontal reflectors (e.g. horizontal-to-vertical spectral ratio method). However, in this thesis emphasis is placed on wave-field modifications due to horizontal inhomogeneities with particular focus on characterizing spatial wave-field variations. Quantifying temporally stable characteristics is not an easy task because the data is often contaminated by transient noise originating from active sources at the surface. The applicability of standard noise filtering techniques (e.g. F-K filtering) is limited because of the small number of synchronized data points and the coarse spatial sampling that have been typical for passive seismic surveys. Furthermore, the surface wave-field is often strongly influenced by shallow structures, which can mask information from greater depth.

To address the above issues, spectral attributes are introduced and applied to quantify and map temporally stable spatial wave-field patterns along the surface. Numerical wave propagation simulations are used to examine different types of subsurface wave-field modification that can cause such patterns. The synthetic data is analyzed in order to explore potentials and limitations of the spectral analysis method. The methodology is also applied to real ambient ground-motion data recorded at an oil and gas field in Austria.

The horizontal location of subsurface wave-field modifications could be successfully detected in simple numerical models featuring a uniform medium and no active noise sources at the surface. Attribute patterns showed indication of the origin of both, active modification (zones of seismic emission) and passive modification (interaction with an inclusion of high attenuation). A realistic velocity distribution and surface noise sources considerably reduced the significance of the results. F-K filtering applied to linear array data successfully recovered information that was beforehand masked by surface noise. F-K filtering failed to suppress surface noise, on the other hand, in cases of inadequate array geometry. Spectral attributes were indicative

of a deep inclusion, despite the presence of a low-velocity surface layer with a strong influence on the wave-field characteristic. Measurements at an oil and gas field show temporally stable attribute patterns in space. Transient and stationary anthropogenic noise in the data could be reduced by applying single station and linear array processing techniques. The interpretation of the observed spatial patterns in terms of subsurface structures and processes showed no fully conclusive results. In particular, patterns collocated with the horizontal location of known hydrocarbon reservoirs could not be unambiguously linked to the presence of the reservoirs.

Spectral analysis is a suitable method to assess the ambient wave-field's characteristic in time, frequency and space. Attribute-based interpretation of temporally stable modifications in frequency and space can provide valuable subsurface information. To minimize possible anthropogenic noise contamination, data should be acquired in quiet areas and/or during the most quiet time periods (usually at night). In addition, large and densely spaced receiver arrays (e.g. regular grids) are recommended to allow effectively filter surface noise. The numerical results indicate that information on both, shallow and deep structures can be simultaneously present in the same data. The difficult task of distinguishing information in attribute profiles on the basis of its origin may be tackled using *a priori* information and statistical correlation methods.

# Zusammenfassung

Das allgegenwärtige seismische Umgebungs-Wellenfeld an der Erdoberfläche ist eine Überlagerung von Wellen, welche an der Oberfläche und im Untergrund erzeugt werden, und das Wellenfeld wird permanent durch Interaktion mit Untergrundstrukturen modifiziert. Passive Aufzeichnungen der Umgebungs-Bodenbewegung beinhalten deshalb wertvolle Informationen über eine Vielzahl von Untergrundstrukturen und -prozessen.

Seismische Methoden basierend auf Laufzeiten sind nicht direkt anwendbar, um solche Informationen zu extrahieren, weil ausgeprägte Events, wie z.B. Erdbeben oder Hammerschläge, in der quasi-stationären Umgebungs-Bodenbewegung normalerweise nicht vorkommen. An Stelle dessen können zeitlich stabile Wellenfeld-Muster in Frequenz und Raum verwendet werden, um Informationen über den Untergrund in Erfahrung zu bringen. Solche spektrale Analysemethoden haben das Potenzial, Informationen über vertikale Inhomogenitäten, wie horizontale Reflektoren, zu liefern (z.B. horizontal-to-vertical spectral ratio Methode). In dieser Doktorarbeit sind jedoch hauptsächlich Wellenfeldmodifikationen aufgrund horizontaler Inhomogenitäten von Interesse, und der Schwerpunkt liegt daher auf der Charakterisierung von örtlichen Variationen im Wellenfeld. Die Quantifizierung von zeitlich stabilen Charakteristiken ist nicht einfach, weil die Daten oft durch Störungen kontaminiert sind, welche von aktiven Quellen an der Oberfläche herrühren. Die Verwendbarkeit von üblichen Filtertechniken um solche Störungen zu entfernen (z.B. F-K Filter) ist eingeschränkt, weil synchronisierte, passive seismische Messungen bisher typischerweise nur mit wenigen, weit auseinanderliegenden Messpunkte gemacht werden. Ausserdem ist das Wellenfeld an der Oberfläche oft stark von untiefen Strukturen beeinflusst, was Information aus grösserer Tiefe verdecken kann.

Um obigen Belangen Rechnung zu tragen werden spektrale Attribute eingeführt und verwendet um zeitlich stabile Wellenfeld-Muster entlang der Oberfläche zu quantifizieren und abzubilden. Numerische Wellenausbreitungs-Simulationen werden verwendet um unterschiedliche Typen von Wellenfeldmodifikationen im Untergrund, welche für solche Oberflächen-Muster verantwortlich sein können, zu untersuchen. Die synthetischen Daten werden analysiert um die Möglichkeiten und die Grenzen der spektralen Analysemethode zu erforschen. Zusätzlich wird die Methodik auch auf reelle Messungen der Bodenbewegung an einem Öl- und Gasfeld in Oesterreich angewendet.

Die horizontale Position von unterirdischen Wellenfeldmodifikationen konnte in einfachen numerischen Modellen mit gleichförmigem Untergrund und ohne aktive Noise-Quellen an der

Oberfläche erfolgreich detektiert werden. Attribut-Muster zeigten den Ursprung sowohl aktiver Modifikationen (Zonen seismischer Abstrahlung) als auch passiver Modifikationen (Interaktion mit einer Inklusion hoher Dämpfung) an. Eine realistische Geschwindigkeitsverteilung und Noise-Quellen an der Oberfläche reduzierten die Signifikanz der Ergebnisse beträchtlich. Durch Anwendung eines F-K Filters auf Daten eines linearen Arrays konnten Informationen, welche zunächst von Oberflächen-Noise überdeckt waren, zurückgewonnen werden. Der F-K Filter versagte hingegen im Falle von ungeeigneter Array-Geometrie. Spektrale Attribute zeigten die horizontale Position einer Inklusion in der Tiefe an, trotz zusätzlicher Anwesenheit einer Tiefgeschwindigkeitsschicht an der Oberfläche, welche das Wellenfeld stark beeinflusste. Messungen an einem Öl- und Gasfeld zeigen zeitlich stabile Attribut-Muster im Raum. Stationärer und instationärer anthropogener Noise in den Daten konnte durch Anwendung von Einzelstations- und Arraymethoden reduziert werden. Die Interpretation beobachteter, räumlicher Muster in Bezug auf unterirdische Strukturen und Prozesse ist nicht schlüssig. Muster, welche mit der horizontalen Position bekannter Kohlenwasserstoff-Reservoirs zusammenfallen, können insbesondere nicht endgültig mit der Anwesenheit der Reservoirs in Verbindung gebracht werden.

Die spektrale Analyse ist eine geeignete Methode, um die Charakteristik des Umgebungs-Wellenfeldes in der Zeit, in der Frequenz und im Raum zu beurteilen. Die Interpretation von zeitlich stabilen Modifikationen in Frequenz und Raum, basierend auf spektralen Attributen, kann wertvolle Informationen über den Untergrund liefern. Um eine mögliche Kontaminierung durch anthropogene Störungen zu minimieren, sollten Messungen nach Möglichkeit in lärmarmen Gebieten und/oder während den ruhigsten Zeiten (meistens in der Nacht) durchgeführt werden. Des Weiteren sind grosse Arrays mit geringen Stationsabständen zu empfehlen (z.B. reguläres Gitter), damit Oberflächen-Noise effizient herausgefiltert werden kann. Die numerischen Resultate zeigen, dass Information über oberflächennahe und tiefe Strukturen gleichzeitig in denselben Daten vorhanden sein können. Die schwierige Aufgabe, solche Informationen in Attribut-Profilen voneinander zu unterscheiden, kann durch *a priori* Information und statistische Korrelationsmethoden in Angriff genommen werden.