

DISS. ETH NO. 21328

STATISTICS OF AMBIENT SEISMIC NOISE:
INVESTIGATIONS INTO SPECTRAL ATTRIBUTES AND
MULTI-COMPONENT ARRAY PROCESSING

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

for the degree of
DOCTOR OF SCIENCES

presented by

Nima Riahi

Dipl. Phys. ETH Zurich

born 21. September 1979

citizen of
Adliswil (ZH)

Accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Jean-Pierre Burg, ETH Zurich (examiner)

PD Dr. Erik H. Saenger, ETH Zurich (co-examiner)

Dr. Gregor Hillers, Université Josef Fourier, Grenoble, F (co-examiner)

Dr. Alex V. Goertz, PGS Geophysical AS, Oslo, NO (co-examiner)

2013

Abstract

Seismic background vibrations, conventionally considered noise in seismology and exploration geophysics, can be used to study and monitor the Earth's subsurface. Suggested techniques loosely fall into three categories: wave field interferometry, array analysis, and spectral attributes of single receiver recordings. In this thesis we present methodological developments and results for the latter two categories.

Studies using spectral seismic attributes face two challenges: the composition of the wave field from which a passive seismic attribute is computed is not known (e.g. *surface-vs-body wave issue*) and correlations between spectral attributes and geologic targets can be confounded by unrelated variables such as noisy infrastructure, shallow resonances, or acquisition footprint (*correlation-vs-causation issue*). We present a statistical strategy to address these two issues. First, joint statistics of spectral density in seismic power and polarization azimuth are used as an approximate means to know when surface waves clearly dominate. Second, a quantitative framework is used to describe seismic attribute-to-target correlations for several attribute parameterizations and different targets. Using data from a producing tight-gas field, we statistically test the hypothesis that hydrocarbon reservoirs can have a measurable effect on passive seismic attributes on the surface. The hypothesis cannot be falsified for the available data.

A three-component frequency-wavenumber processor is developed to jointly analyze back azimuth, phase velocity, and polarization of ambient surface waves. The processor is applied on an exploration scale to perform a time-lapse study of ambient surface wave anisotropy above an underground gas storage reservoir. Existing anisotropy, probably caused by the preferred orientation of local faults, is found to be accentuated between 0.4-0.6 Hz when the reservoir is close to its maximum fill. This implies that reservoir pore pressure could be monitored using seismic noise. The processor is also applied on a regional scale to study azimuthal surface wave anisotropy in Southern California. One year of ambient surface wave noise (2012) provides us with sufficient data points and illumination to constrain 2θ and 4θ Rayleigh wave anisotropy with unprecedented precision and sensitivity. The findings are a further testament to the inferential power afforded by array processing of seismic noise.

Zusammenfassung

Seismische Hintergrundvibrationen – in der Seismologie und Explorations-Geophysik häufig als Störsignal betrachtet – lassen sich zur Erkundung des Erduntergrundes nutzen. Hierzu vorgeschlagene Methoden können grob in drei Kategorien eingeteilt werden: Wellenfeld Interferometrie, Array Analyse und spektrale Attribute. Die vorliegende Arbeit stellt methodologische Entwicklungen und Resultate vor, die dem Bereich letzterer zwei Kategorien angehören.

Auf spektralen seismischen Attributen beruhende Untersuchungen haben zwei Schwierigkeiten zu bewältigen: Die Attribute basieren auf Wellenfeldern, deren Eigenschaften nur ungenügend bekannt sind (z.B. *Oberflächen-vs-Körperwellen Thematik*) und zweitens kann die Korrelation zu einem geologischen Zielobjekt tatsächlich verursacht sein durch oberflächennahe Eigenschaften oder der Signatur seismischer Lärmquellen (*Korrelation-vs-Kausalität*). Um diese Probleme anzugehen stellen wir eine zweistufige Strategie vor. Die Statistik der spektralen Dichte sowohl der seismischen Leistung wie auch des Polarisationsazimuths werden genutzt um zu erkennen in welchen Zeitfenstern Oberflächenwellen klar dominieren. Des Weiteren wird ein quantitativer Ansatz genutzt zur Beschreibung von Korrelationen zwischen seismischen Attributen unterschiedlicher Parametrisierung und mehreren Zielobjekten. Basierend auf Felddaten von einem aktiv betriebenen Gasfeld prüfen wir die Hypothese wonach Kohlenwasserstoff Lagerstätten einen messbaren Effekt auf an der Oberfläche gemessenen passiven Attributen haben können. Für den untersuchten Datensatz kann die Hypothese nicht falsifiziert werden.

Ein drei-komponenten Array Rechner wird entwickelt, der Einfallsrichtung, Phasengeschwindigkeit und Polarisation einfallender Umgebungsoberflächenwellen ermittelt. Wir wenden den Rechner auf der Explorationsskala an, um Oberflächenwellenanisotropie über einem unterirdischen Gasspeicher während zweier Zeitpunkte zu erfassen. Eine wahrscheinlich durch die Vorzugsrichtung der lokalen Bruchsysteme verursachte Anisotropie wird dabei zwischen 0.4-0.6 Hz verstärkt wenn der Speicher sich Nahe der operativen Maximalfüllung befindet. Die Beobachtung deutet auf eine mögliche Anwendung hin: Die Überwachung des Porendrucks in geologischen Lagerstätten mittels seismischen Hintergrundrauschens. Der Array Rechner wird auch auf regionaler Skala genutzt zur Messung von Oberflächenwellenanisotropie in Südkalifornien. Seismisches Oberflächenwellenrauschen aus einem Jahr (2012) liefert uns genügend

Datenpunkte und Ausleuchtung, um 2θ und 4θ Rayleigh Wellen Anisotropie mit bisher unerreichter Präzision und Empfindlichkeit zu messen. Die Resultate sind ein weiterer Ausdruck der Aussagekraft von Studien seismischen Rauschens mittels Arrays.