

**Simulation of seismic wave fields in  
inhomogeneous half-plane by  
non-conventional BEM**

Dissertation  
zur Erlegung des akademischen Grades  
Doktor–Ingenieur  
an der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen  
Fakultät der Christian-Albrechts-Universität zu  
Kiel

vorgelegt von  
**Ioanna-Kleoniki M. Fontara**

Kiel 2015

## Abstract

The estimation of seismic motion in regions with natural or induced seismicity is increasingly becoming important nowadays. Seismic motion is influenced by the dynamic characteristics of the seismic source, the wave propagation path, the surface topography, the soil layering, plus the mechanical properties of the surrounding geological materials. From an engineering point of view, local site conditions generate large amplifications as well as spatial variations in the seismic motions, which are important for the analysis and design of large infrastructure such as dams, bridges, industrial plants and pipelines. To date, no seismic design code has succeeded to fully address the case of local site conditions due to the sheer complexity of the problem. As a result one of the major objectives in earthquake engineering is to develop mechanical models and accompanied numerical tools able to estimate the seismic field in complex geological media. Among the numerical methods the BEM is recognized as a valuable technique to solve wave propagation problems due to many advantages in comparison with other domain techniques.

The major contribution of the present thesis is the development of non-conventional BEM numerical schemes and accompanied research software for wave propagation in continuously or discrete inhomogeneous geological media with heterogeneities such as homogeneous or graded layers, cavities, tunnels and valleys. In the BEM formulation is efficiently inserted a library of fundamental solutions and Green's functions that account for different types of material gradient; in contrast to the conventional BEM formulations which employ fundamental solutions for homogeneous media. Hence, the main advantages and novelty of the proposed method are as follows: (a) direct modeling of the inhomogeneity through the use of a library of special class of functions; as a result different models of the geological media are investigated; (b) the ability to account for all three components of the problem (source - wave path inhomogeneity - surface topography) in one step; (c) due to the usage of the Green's function and special class of fundamental solutions, the solution accuracy increases and the computational time and memory is reduced.

A successful validation with existing solutions as well as a series of parametric studies considering different geological configurations and seismic scenarios is given for SH-wave propagation. All results reveal the potential of the developed models to study wave propagation in complex geological profiles with high accuracy

and minimal modeling effort. Considering the investigated problem of SH-wave propagation, it is evidently demonstrated the sensitivity of the seismic signal to the existence and type of the material gradient, to the type and properties of the seismic source and to the lateral inhomogeneity due to the free-surface and/or sub-surface relief peculiarities such as layering, tunnels, cavities, valleys. Seismic signals in time domain are generated at the surface of complex geological profiles using inverse Fourier transformation able to describe efficiently and with high accuracy all three components of the Earth system; seismic source, wave path and local geological region of interest.

Applications of the developed numerical tools in material modeling and earthquake engineering are conducted. For the former application, wave propagation phenomena are reproduced in a continuous matrix with position dependent-material properties and containing any number and configuration of cavities for pure elastic and poroelastic geological media. Stress and displacement field is presented. For the latter application, the influence of site effects on ground motions and subsequent structural damage of aboveground constructions is investigated considering 2D analysis of the soil profile. Bridge and building models are examined under site dependent ground motions computed at the surface of complex geological profiles that account for canyon topography, soil layering and material gradient.

---

## Zusammenfassung

Die Einschätzung der seismischen Bewegungen in Regionen mit natürlicher oder induzierter Seismik ist ein in der heutigen Zeit zunehmend wichtiger und aktueller Punkt. Die seismischen Bewegungen des Bodens werden beeinflusst durch die dynamischen Eigenschaften der Quelle, den Wellenpfad, die lokalen oberflächennahen Standortbesonderheiten, die Schichtungsstruktur und die mechanischen Eigenschaften des Bodens. Lokale Standortbedingungen können grosse Verstärkungen sowie ausgeprägte räumliche Variationen in den seismischen Bewegungen erzeugen, die für die Analyse und das Design grosser Infrastrukturprojekte, wie Dämme, Brücken, Industrieanlagen und Rohrleitungen wichtig sind. Aufgrund der immensen Komplexität dieses Problems ist es bisher keiner Erdbebennorm möglich, den Fall der lokalen Standortbedingungen vollständig anzusprechen. Somit ist eines der wichtigsten Ziele der Erdbebenforschung, mechanische Modelle und numerische Tools zu entwickeln, die in der Lage sind, die seismischen Bewegungen in komplexen geologischen Medien berechnen zu können. Unter den numerischen Methoden ist die Randelemente-Methode (BEM) als eine wesentliche Methode zur Analyse von Wellenausbreitungsproblemen anerkannt. Sie besitzt im Vergleich zu anderen Domain-Techniken eine Reihe von Vorteilen.

Der wichtigste Beitrag der vorliegenden Promotionsschrift ist die Entwicklung einer nicht-konventionellen Randelemente (BEM) Methode und die Entwicklung einer Forschungs-Software zur Wellenausbreitung in kontinuierlichen oder diskreten inhomogenen geologischen Medien mit Heterogenitäten (z.B. homogen oder gradierten Schichten, Hohlräume, Tunnel und Täler). Diese BEM Implementierung beinhaltet eine Bibliothek von Fundamentallösungen und Green'schen-Funktionen, welche verschiedene Arten von internen Materialsteifigkeitsgradienten bzw.-heterogenitäten darstellen können. Die folgenden Punkte sind die wichtigsten Vorteile und Neuheiten der genutzten Methoden: (a) direkte Modellierung der Inhomogenität durch die Verwendung einer Bibliothek von spezifischen Funktionen; wodurch unterschiedliche Modelle der geologischen Struktur analysiert worden; (b) die Möglichkeit, alle drei Komponenten des Problems (Quelle - Wellenpfad Inhomogenität - oberflächlichen Standortbesonderheiten) in einem Schritt darzustellen; (c) wegen der Nutzung der Green'schen-Funktion und einer Sonderklasse von Fundamentallösungen, wodurch die Lösungsgenauigkeit erhöht und Rechenzeit und der erforderliche Speicherplatz reduziert wurde.

Eine erfolgreiche Validierung anhand vorhandener analytischer Lösungen sowie eine Vielzahl von Parameterstudien unter Berücksichtigung unterschiedlicher geologischer Konfigurationen und seismischer Szenarien für SH-Wellenausbreitung wurden durchgeführt. Alle Ergebnisse zeigen dass, die entwickelten Modelle zur Untersuchung der Wellenausbreitung unter komplexen geologischen Bedingungen ein hohes Potential zur erfolgreichen und genauer Problemlösung beim minimalen Modellierungsaufwand besitzen. In Anbetracht des untersuchten Problems der SH-Wellenausbreitung wurde nachgewiesen, dass die Empfindlichkeit des seismischen Signals auf (1) das Vorhandensein und die Art der Materialänderung, (2) der Art und der Eigenschaften der seismischen Quelle und (3) den seitlichen Inhomogenität aufgrund der Freifläche und / oder Sub-Oberflächenrelief wie z.B. Schichtung, Tunnel, Höhlen, Tälern vorhanden ist. Ausgehend davon wurden seismische Zeitbereichs-Signale an der Oberfläche der komplexen geologischen Profile berechnet, welche effizient und mit hoher Genauigkeit das Bewegungsmuster bzw.– einfluss der seismischen Quelle, Wellenpfad und der lokalen geologischen Region signifikant abbilden.

Abschliessend erfolgten Betrachtungen zur Anwendung der entwickelten numerischen Methoden in den Gebieten der Materialmodellierung und dem Erdbeben-Ingenieurwesen. Für die erste Anwendung wurden die Wellenausbreitungsphänomene in einem kontinuierlichen Material/Raum mit positionsabhängigen Materialeigenschaften und mit einer beliebigen Anzahl bzw. Konfiguration der Hohlräume in rein elastischen oder poro-elastischen geologischen Medien abgebildet. Dabei erfolgte die Berechnung des Spannungs- und Verschiebungsfeld innerhalb des Kontinuums. In der letzten Anwendung erfolgte die Analyse eines Einflusses der lokalen Standortbedingungen auf die Bodenbewegungen und sich anschliessende potentiellen Strukturschäden der oberirdischen Baustrukturen. Als Strukturmodelle wurden Brücken und Gebäude analysiert, wobei relevante Bodenbewegungen an der Oberfläche entsprechender geologischer Modelle berechnet wurden. Die dazu genutzte Modellierung des geologischen Raums berücksichtigt Materialänderungen über die Tiefe, Bodenschichtung und Oberflächentopographien.