

**Simulation der Erschütterungsausbreitung bei
Schornsteinsprengungen mit Hilfe der
Scaled-Boundary-Finite-Elemente-Methode**

**Simulation of wave propagation due to chimney
detonation using the Scaled Boundary Finite
Element Method**

An der Fakultät Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Dresden
zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
vorgelegte

Dissertation

von
Dipl.-Ing. Jana Sue Bochert
aus Ingersheim.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Erschütterungsausbreitung im Boden als Folge von Schornsteinsprengungen. Das besondere Augenmerk gilt dabei einer mechanisch zuverlässigen und numerisch robusten Beschreibung des unbegrenzten Bodenkontinuums im Zeitbereich, um schließlich die transiente Erregung durch Trümmeraufprall simulieren zu können.

Zur Gewinnung von numerischen Berechnungen wurden im Rahmen dieser Arbeit zwei Module entwickelt. Zum einen handelt es sich um das Bodenmodell eines Halbraums und zum anderen um mathematisch-mechanische Modelle für die Simulation der eigentlichen Schornsteinsprengung. Mit der Verbindung dieser beiden Module werden Erschütterungen als Schwinggeschwindigkeiten berechnet.

Das numerische Bodenmodell wird mit der Kopplung des Fernfeldes (Scaled-Boundary-Finite-Elemente-Methode) an das Nahfeld (Finite-Elemente-Methode) generiert. Im Rahmen dieser Arbeit wurden für die Transformation in den Zeitbereich die konventionelle Methode der resultierenden Impulsantwort und die Transformation der dynamischen Steifigkeit durch algebraische Algorithmen herangezogen. Aufgrund gewonnener Erkenntnisse über die numerische Stabilität liegt der Fokus auf dem zweidimensionalen Large-Scale-Modell. Mit Untersuchungen zur Ausbreitung von Schwingungen wurde der Einfluss der auf Richtwerten basierenden orthogonalen Netzstrukturen analysiert und darüber hinaus wurden freiheitsgradreduzierende Netzvarianten vorgestellt. Diese Richtwerte basieren auf der Relation zwischen Wellenlänge, Frequenz und Ausbreitungsgeschwindigkeit. Im Zuge dieser Untersuchung wurde festgestellt, dass die Belastungsform ebenfalls die Schwinggeschwindigkeiten prägen kann und damit für die Abbildung transienter Erregung relevant ist.

Für die Berechnung der Erregerquellen wurden mathematisch-mechanische Modelle vorgestellt, mit denen es möglich ist, den Detonationsdruck der Bruchstellen während des Fallvorgangs und die daraus resultierenden Aufprallgeschwindigkeiten zu bestimmen. Mittels eines Impulses wird das entsprechende Bodenmodell beaufschlagt, für das eine Kompressionsdauer und ein Energiedissipationsfaktor zu bestimmen waren.

Aus den Vorkenntnissen der analysierten Netzdiskretisierung und mit den ermittelten impaktinduzierenden Größen des Schornsteins kann die Simulation der Erschütterungen infolge von Schornsteinsprengungen durchgeführt werden. Diesbezüglich wurden in der Praxis ausgeführte Schornsteinsprengungen rekonstruiert und die numerischen Berechnungen mit In-situ-Messungen und Videoanalysen verglichen, die zeitsynchron zur Sprengung durchgeführt wurden. Dieses Vorgehen wurde beispielhaft an zwei Schornsteinsprengungen demonstriert.

Zusammenfassend für beide Simulationen wurde erkannt, dass die berechneten Ergebnisse mit den In-situ-Messungen in Einklang gebracht werden können. Abweichungen sind auf die reale Sprengsituation mit der komplexen Bodenformation zurückzuführen. Die hier prognostizierten Ergebnisse basieren auf Annahmen, die sich an ingenieurmäßigen Abschätzungen orientieren. Es wurde jedoch stets mit den ungünstigsten Annahmen gerechnet, um bei der Prognose auf der sicheren Seite zu liegen.

Mit dieser Arbeit besteht die Möglichkeit, Erschütterungsausbreitungen durch Schornsteinsprengungen gut zu berechnen, so dass diese zukünftig zur Prognose bei weiteren Sprengungen herangezogen werden können.

Summary

This dissertation investigates the propagation of soil vibrations due to chimney detonation. The main focus is on a mechanically reliable and numerically robust description of the infinite soil continuum within the time domain, in order to simulate transient excitation caused by the falling wreckage.

Two modules for the numerical computation of soil vibrations were developed: one to account for the soil continuum and one for the mathematical and mechanical description of the detonation. Both were combined to predict the soil vibrations as oscillation velocity.

The numerical soil model contains two fields. One close to the excitation, modeled by Finite Element Method and the other far away, modeled by Scaled Boundary Finite Element Method. Both were coupled to describe the soil as a half space. The dynamic stiffness was transformed to the time domain using the conventional method of the unit acceleration impulse response with algebraic algorithms. A large-scale-model in two dimensions is introduced, because of findings concerning numerical stability. Oscillation propagation was investigated for the influence of certain criteria, based on orthogonal mesh structures. These criteria are based on the relation between wave length, frequency and propagation velocity. Different mesh versions with few degrees of freedom are introduced. This investigation revealed that the shape of the load has an effect on the oscillation speed of the soil and is therefore significant for the prediction of the structural response.

Mathematical-mechanical models, that allow the computation of the detonation pressure of the sites of fracture during the fall and the resulting impact speed are presented. The appropriate soil model is loaded with an impulse, whereupon the compression time and energy dissipation is computed.

Wave propagation can now be calculated based on previous findings on the analysed mesh discretization and the estimated impact inducing quantities of the chimney. These simulations are compared with real life detonations of chimneys, by means of measurements and video analysis. The resulting applicable method is demonstrated in two realistic examples.

To summarize, it was found that the calculated oscillation speed values generally correspond to the in-situ-measurements. However, the complexity of the soil formation and the real detonation simulation are causing differences. Assumptions made for unknown quantities ensured that the expected computational result provides a reliable prediction.

The methods introduced in this dissertation facilitate the calculation of wave propagation caused by chimney detonations and thus allow predictions to be made for future detonation.