Dreidimensionale Finite-Element-Baugrundmodelle für Ingenieurprobleme

Dipl.-Ing. M. Burghardt
Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen
Technische Universität Darmstadt
Petersenstr. 13 64287 Darmstadt, Germany
email: burghard@iib.tu-darmstadt.de
Tel: +49 6151 16 6745, Fax: +49 6151 16 5552

Kurzfassung

Die Berücksichtigung der Interaktion von Baugrund und Tragwerk in der numerischen Simulation komplexer Bauwerke ist das wissenschaftliche Thema der Forschergruppe „Baugrund Tragwerk Interaktion". Die hier vorgestellte Arbeit ist im Rahmen der Forschergruppe entstanden und beschäftigt sich mit der für die Finite-Element-Berechnung notwendige Modellierung und Netzgenerierung der Baugrund-Tragwerk-Struktur.

Bei komplexen Gründungskonstruktionen ist eine Diskretisierung für eine Finite-Element-Analyse, die das geotechnische System, dessen Randbedingungen und Lasten umfassend berücksichtigen, erforderlich. Geeignete Software-Werkzeuge sind zur Erstellung des Modells notwendig. Ziel der hier vorgestellten Forschungsarbeit war die Entwicklung eines Generators für dreidimensionale, zeitabhängige Finite-Element-Diskretisierungen. Das Werkzeug hat die Fähigkeit zur Verwaltung der ereignisabhängigen Bauzustände in einem dynamischen Modell.

1 Einleitung

Das Bauen in stark verdichteten innerstädtischen Gebieten hat sich in den letzten Jahrzehnten stark verändert. Zum einen sind die Ingenieurbauwerke durch zunehmende Höhe komplexer geworden. Die steigende Anzahl der benötigten Parkplätze in den Gebäuden wird in der Regel durch eine Tiefgarage realisiert, die eine steigende Anzahl von Geschossen unter der Erdoberfläche benötigt. Hierdurch erhöhte sich die durchschnittliche Tiefe der Baugruben der Gebäude in den letzten Jahren stark. Extrem hohe Grundstückspreise in den Innenstadtlagen bewirkte, daß die Gebäude immer näher an den alten Bestand der Gebäude heran gebaut werden. Absenkungen der bestehenden Gebäude durch einen Neubau sind normalerweise möglichst gering zu halten. Aus ökologischen Gründen sind Grundwasserabsenkungen heutzutage nicht mehr in dem Ausmaß möglich, wie man sie noch vor einem Jahrzehnt durchführte.

Die dargestellte Entwicklung bewirkt eine Steigerung im Aufwand der Gründung neuer Gebäude bzw. im Bereich der Verbauung der immer tiefer werdenden Baugruben. Diese stark erhöhten Anforderungen an den Entwurf haben sich nur bedingt in einer Verbesserung der Entwurfs- und Modellierungstechniken wiedergespiegelt.

Eine Vorgehensweise für einen ganzheitlichen Entwurf ist in [Diaz 1998], [Schönenborn 1999] und [Meißner u. a. 1996] beschrieben. Ein zentrales dreidimensionales zeitabhängiges Baugrundmodell wurde entwickelt und mit den Methoden der objektorientierten Modellierung in ein Software-Werkzeug umgesetzt. Die Ganzheitlichkeit des Baugrundmodells ließ sich durch die Durchgängigkeit von objektorientierter Analyse, Entwurf und Programmierung realisieren.

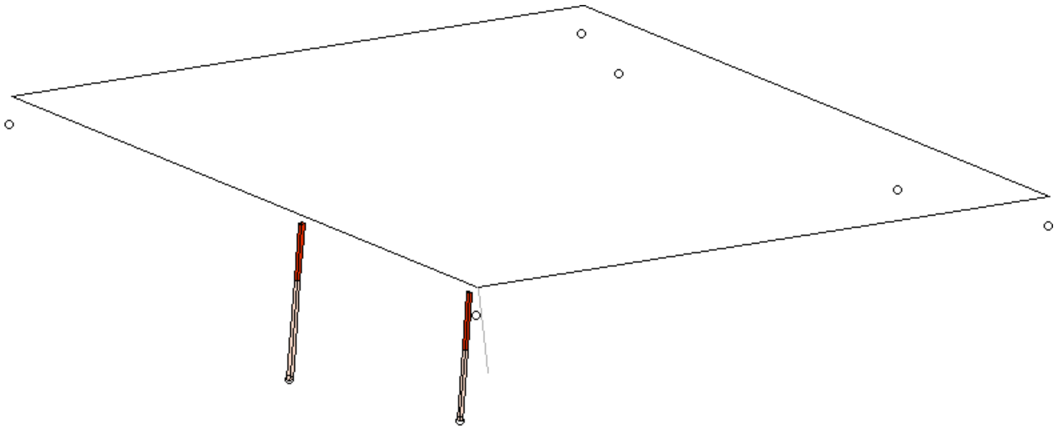

Abbildung 1: *Baugrundmodell, Ausgangszustand*

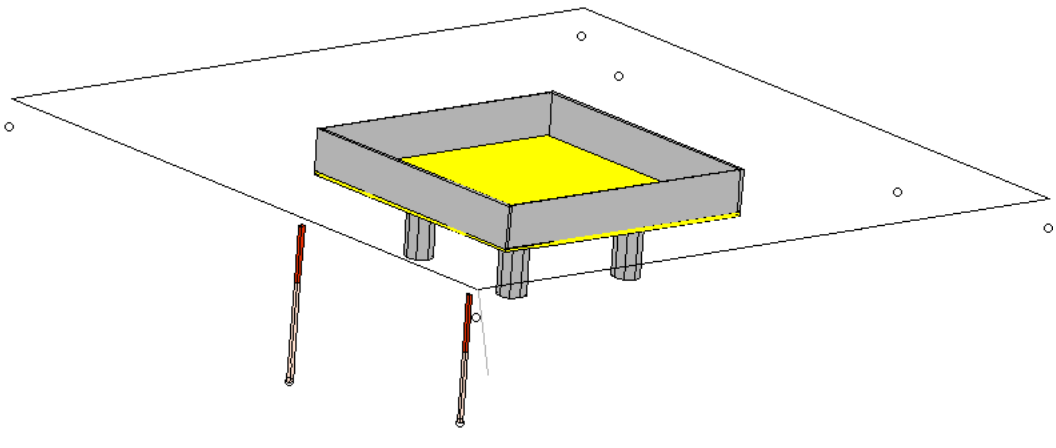

Abbildung 2: *Baugrundmodell, Bauzustand*

Das Baugrundmodell besteht aus drei Komponenten:

Bodenmodell Eine dynamische, auf schnelle Zugriffe hin optimierte Datenstruktur ermöglicht die Verwaltung einzelner Bauzustände des Baugrundes. Ausgangsbasis eines Modells ist in der Regel der ungestörte Baugrund. Weitere

Bauzustände werden durch Einbringen der Veränderungen der Bodengeometrie und Bodeneigenschaften während des Bauablaufes erzeugt.

Konstruktionsmodell Die verschiedenen geotechnischen Konstruktionselemente wie z.B. Bodenplatten, Fundamente, Pfähle, Verbauwände und Anker werden im Konstruktionsmodell verwaltet.

Bauablaufmodell Ein Bauablaufmanager ermöglicht die Modellierung des zeitlichen Ablaufs der Bauzustände. Als Grundlage dient hier ein Netzplan, der die relevanten Bauzustände und Bauvorgänge beschreibt und deren Abhängigkeiten aufzeigt.

Das beschriebene Baugrundmodell ermöglicht die Modellierung und Administration des Baugrunds. Unterstützt wird der Anwender des Systems durch die Möglichkeit der Generierung unterschiedlicher Sichten auf das Baugrundmodell. Dreidimensionale Visualisierungstechniken ermöglichen einen Überblick über den Gesamtzusammenhang und über Details des Entwurfes zu erhalten [Diaz u. a. 1997].

2 Finite-Element-Modellierung

Basierend auf diesem Sichten-Modell ist ein Finite-Element-Netzgenerator in das System implementiert worden.

2.1 Mehrphasen-Kontinuum

Eine Finite-Element-Beschreibung eines Baugrundes ist auf der Basis der Theorie der Porösen Medien möglich. Der Boden, der aus den Bestandteilen Korngerüst, Flüssigkeit und Gasen besteht wird nach der „Mischungstheorie“ und dem „Konzept der Volumenanteile“ zu einem kontinuierlichen, superponierten Kontinua mit inneren Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Phasen [Hartmann und Meißner 1988], [Hartmann und Meißner 1989], [Ehlers 1998].

2.2 Bedingungen für die Netzgenerierung

Aus der Beschreibung des Tragverhaltens des Bodens als kontinuierliches System als auch aus der Komplexität der geotechnischen Konstruktionselemente ergeben sich eine Reihe von Anforderungen an die Netzgenerierung:

Dreidimensionalität Eine ganzheitliche Modellierung des Baugrundes ist nur dreidimensional möglich. Eine Berücksichtigung der Bodenbeschaffenheit und Konstruktionselemente ist in einem zweidimensionalen Modell nicht möglich.

Berechnungsprogramm Eine Implementation des FE-Bodenmodells wurde im Rahmen der Forschergruppe in dem Programm FEAP [Taylor 1998] vorgenommen. Als Elementtypen stehen hierfür zwei Geometrien zur Verfügung: ein Viereckelement mit neun Knoten und ein Hexaederelement mit 20 Knoten. Da

Elementtyp	optimale Element-anzahl je Knoten
Dreieck	6
Viereck	4
Tetraeder	24
Hexaeder	8

Tabelle 1: *Reguläre Knoten: Optimale Anzahl der an einen Knoten angrenzenden Elemente*

eine dreidimensionale Vernetzung notwendig ist, scheidet das Viereckelement für die Verwendung aus.

Verfeinerungen Eine Verfeinerung des Elementnetzes ist an einigen Stellen zur Minimierung des Berechnungsfehlers notwendig. Zum Auffinden dieser Stellen können Fehlerindikatoren wie sie in [Meißner und Wibbeler 1990] vorgeschlagen werden und in [Olden 1998] Anwendung finden, verwendet werden.

Randbedingungen An das durch den Netzgenerator erzeugte Netz sind verschiedene Randbedingung zu stellen. Zum einen ist es notwendig, die Geometrie der geotechnischen Konstruktionselemente im Netz abzubilden sowie die Baugrundstruktur richtig zu übernehmen. Des weiteren sind Randbedingungen der Finiten Elemente durch den Netzgenerator zu unterstützen, bzw. zu berücksichtigen. Diese Randbedingungen können Lasten, Lagerungen aber auch Kontaktflächen sein.

3 Vorgehensweise bei der Netzgenerierung

Die Netzgenerierung für Baugrundstrukturen muß die oben genannten Anforderungen erfüllen. Bei den Netzen für Finite-Elemente-Simulationen muß man zwischen zwei Arten unterscheiden: strukturierte Netze und unstrukturierte Netze. Der Unterschied zwischen den beiden Arten erklärt sich aus der Definition der strukturierten Netze.

Definition 1 *Ein Elementnetz wird als strukturiert bezeichnet, wenn alle inneren Knoten reguläre Knoten sind.*

Ein Knoten wird als regulär bezeichnet, wenn an diesen Knoten die optimale Anzahl von Elementen angrenzt. Die optimale Anzahl von Elementen an einem Knoten ist der Tabelle 1 zu entnehmen. Die Verwendung von strukturierten Netzen ist bei komplexen Geometrien oder auch bei lokalen Verfeinerungen nicht immer möglich, weshalb wir uns im Rahmen dieser Arbeit für die Verwendung unstrukturierter Netze entschieden wurde.

Zur automatischen Generierung unstrukturierter Netze sind in den letzten Jahrzehnten eine Reihe von verschiedenen Netzgeneratoren entwickelt worden. Die meisten der Algorithmen eignen sich für Dreieckelemente und Tetraederelemente. Für Viereckelemente existieren wesentlich weniger Algorithmen. Für die hier benötigten Hexaederelemente gibt es keinen Algorithmus, bei dem man die Diskretisierung am Rand vorgeben kann und zusätzlich die Elementgrößen im Inneren steuern kann. Die Generierung der Hexaederelemente wurde daher mit der Projektionstechnik realisiert.

3.1 Projektionstechnik

Die Projektionstechnik ist eine Technik zur Generierung von Netzen aus Prismaelementen aus zweieinhalb-dimensionalen Beschreibungsdaten der zu vernetzenden Geometrie. Die Projektionstechnik wird anhand des Bauzustandes des Beispiels aus Abbildung 2 dargestellt und besteht aus folgenden Schritten:

Projektion Sämtliche Bauteile und geologischen Gegebenheiten werden auf eine Ebene in Form von Linien und Punkten projiziert (Abbildung 3 a).

2D-Netzgenerierung Unter Berücksichtigung dieser Linien und Punkte wird ein zweidimensionales Netz mit Dreiecken oder Vierecken generiert. Um Hexaederelemente zu erhalten müssen Vierecke verwendet werden. In der hier vorgestellten Anwendung werden die Viereckelemente aus Dreiecken erzeugt. Das temporär erzeugte Dreiecknetz ist in Abbildung 3 b) dargestellt.

3D-Elemente Unter Berücksichtigung der verschiedenen Höheninformationen und den Kantenlängen wird für jedes Viereck eine Säule von Hexaederelementen erzeugt (Abbildung 4).

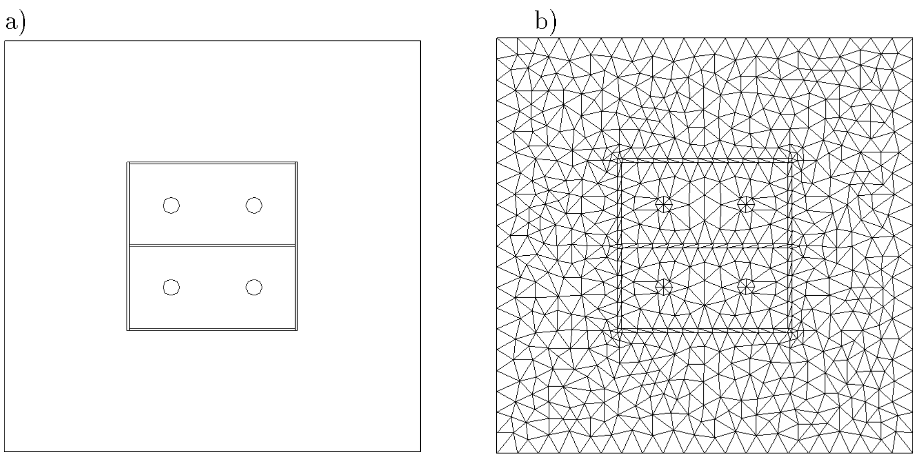

Abbildung 3: *Projektionstechnik a) Linien, b) Dreiecknetz*

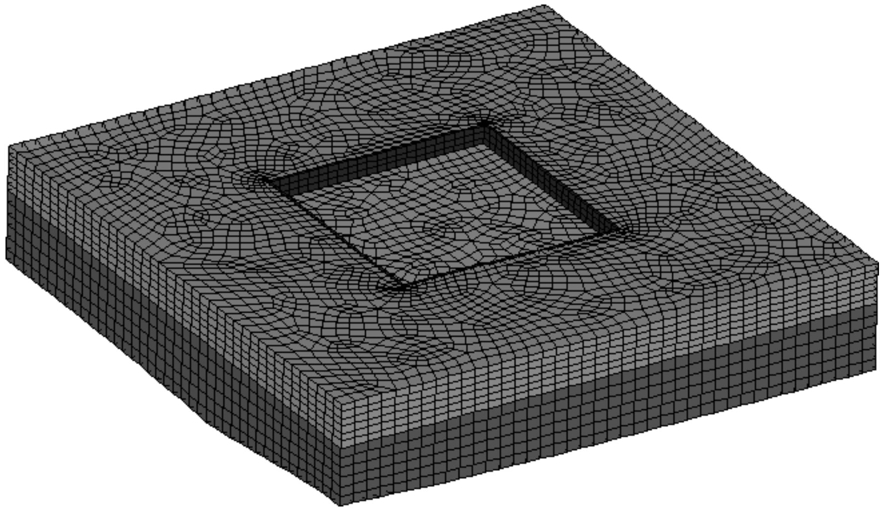

Abbildung 4: *Finite Element-Modell*

3.2 Netzverfeinerung

Lokale Verfeinerungen sind bei der Verwendung der Finite-Element-Methode an verschiedenen Stellen aufgrund der Konvergenz des Verfahrens notwendig. Eine Steuerung der Elementdichte ist bei der Generierung von Hexaederelementen nur schwer möglich. Bei der Projektionstechnik würde man durch ein verfeinertes Vierecknetz sehr unförmige Elemente erhalten, da die Anzahl der Elementschichten aufgrund der Kompatibilität überall gleich groß sein muß. Daher wurde für das Ausgangsnetz eine konstante Netzdichte gewählt und Verfeinerungen nachträglich eingebaut.

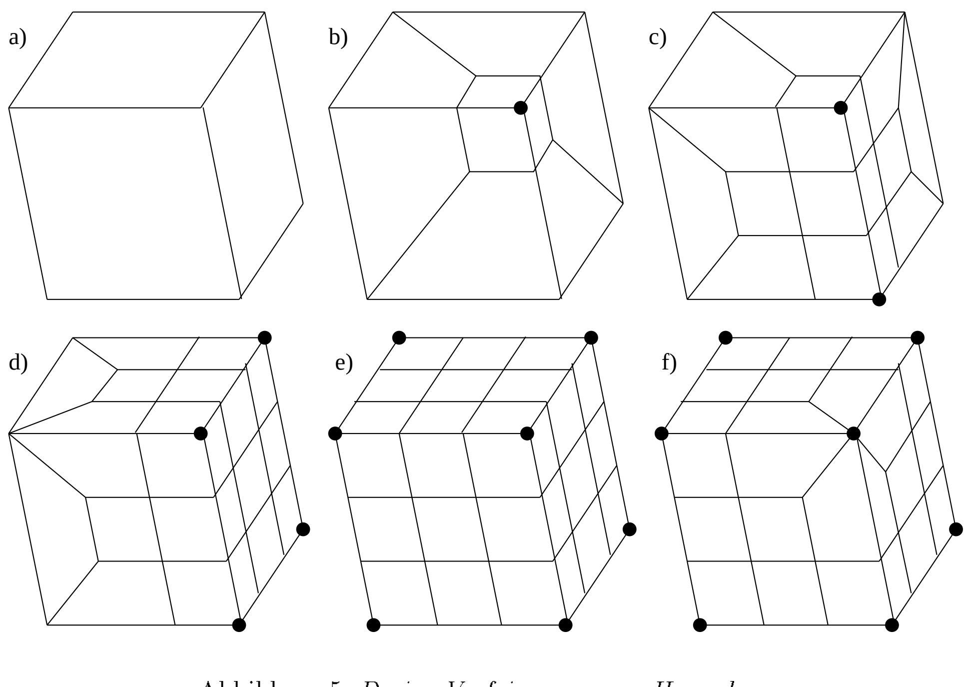

Abbildung 5: *Dreier-Verfeinerung von Hexaedern*

Zur Verfeinerung von Hexaederelementen ist nur eine Verfeinerungsart möglich. Bei dieser wird jede Kante in der zu verfeinernden Region in drei Teilkanten geteilt, weshalb man auch von dreier-Verfeinerung spricht. Zur Verfeinerung beliebiger Regionen sind 22 Übergangsnetze notwendig [Schneiders u. a. 1996]. Von diesen Übergangsnetzen lassen sich einige, wie das in Abbildung 5 f) dargestellte, beweisbar nicht generieren [Mitchell 1996]. Die Übergangsnetze, die in Abbildung 5 a) - e) dargestellt sind, sind alle generierbar. Diese Übergangsnetze ermöglichen zusammen die Verfeinerung von konvexen Gebieten. Zu verfeinernde Regionen müssen daher konvex sein. Falls eine Region nicht konvex ist, kann diese durch hinzunehmen weiterer Elemente konvex gemacht werden. Ein rekursives mehrfaches Verfeinern einer Stelle ist problemlos möglich.

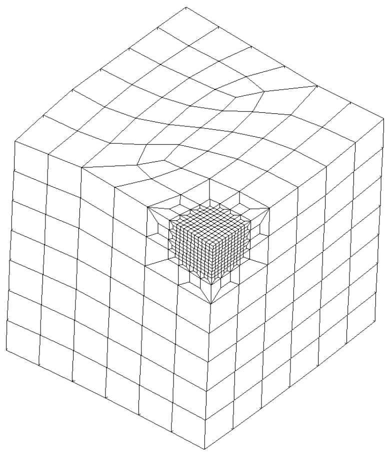

Abbildung 6: *Lokale Verfeinerung eines Hexaedernetzes*

4 Zusammenfassung

Bei komplexen Gründungskonstruktionen sind Planungsfehler nur durch eine ganzheitliche Modellierung vermeidbar. Manuelle Berechnungsmethoden ermöglichen ein ganzheitliches dreidimensionales Vorgehen nicht. Numerische Berechnungsmethoden wie z.B. die Finite-Element-Methode sind ein optimales Werkzeug für den Ingenieur zur dreidimensionalen ganzheitlichen Lösung des Problems. Die für die Finite-Element-Analyse notwendige dreidimensionale Diskretisierung komplexer Baugrundstrukturen ist manuell nicht zu bewältigen.

Der vorliegende Beitrag zeigt, wie aufbauend auf einem ganzheitlichen Sichtenmodell verschiedene Bauzustände einer Baugrundstruktur automatische in ein Finite-Element-Modell unter Berücksichtigung der spezifischen Anforderungen der numerischen Methoden umgewandelt werden können.

Literatur

[Diaz 1998] DIAZ, J.: Objektorientierte Modellierung geotechnischer Systeme. In: *Dissertation, TU-Darmstadt, Fachbereich Bauingenieurwesen, Bericht 2/98 des Instituts für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen, Technische Universität Darmstadt* (1998)

[Diaz u. a. 1997] DIAZ, J. ; MEISSNER, U. ; LÄMMER, L.: Das objektorientierte geotechnische Modellierungssystem. In: *Vorträge zum Workshop Baugrund-Tragwerk-Interaktion* (1997)

[Ehlers 1998] EHLERS, W.: Ein Mehrphasen-Stoffmodell für Böden mit Übergang auf Interface-Gesetze. In: *Arbeitsbericht der DFG-Forschergruppe Baugrund-Tragwerk-Interaktion der Technischen Universität Darmstadt für den Zeitraum vom 1.7.96 bis 31.12.97* (1998)

[Hartmann und Meißner 1988] HARTMANN, Thomas ; MEISSNER, Udo: About the Numerical Analysis of Dynamics in Multi-Component-Continua. In: CUSTODIO, E. (Hrsg.) ; GURGUI, A. (Hrsg.) ; FERREIRA, J. P. L. (Hrsg.): *Groundwater Flow and Quality Modelling*, 1988, S. 539–546

[Hartmann und Meißner 1989] HARTMANN, Thomas ; MEISSNER, Udo: A Multi-Component Finite-Element Model for the Dynamic Analysis of Soil-Water-Air Structures. In: CHUNG, T.J. (Hrsg.) ; KARR, G. R. (Hrsg.): *Proceedings of the Seventh International Conference of Finite Element Methods in Flow Problems*, 1989

[Meißner u. a. 1996] MEISSNER, U. ; DIAZ, J. ; SCHÖNENBORN, I. ; KRÜGER, R.: Object-oriented modelling of three-dimensional hydro-geotechnical systems. In: ALDAMA, A.A. (Hrsg.) ; APARICIO, J. (Hrsg.) ; BREBBIA, C.A. (Hrsg.) ; W.G.GRA AND, I.Herrera (Hrsg.) ; PINDER, G.F. (Hrsg.): *Computational Methods in Subsurface Flow and Transport Problems* Bd. 1, Computational Mechanics Publications, Southampton, Boston, 1996, S. 709–716

[Meißner und Wibbeler 1990] MEISSNER, U. ; WIBBELER, H.: A-Posteriori Errors of Finite Element Models in Groundwater and Seepage Flow. In: *VIII International Conference on Computational Methods in Water Resources, Venedig* (1990)

[Mitchell 1996] MITCHELL, S. A.: A characterization of the quadrilateral mesh of a surface which admit a compatible hexahedral mesh of enclosed volume. In: *Proc. STACS' 96 Grenoble* (1996)

[Olden 1998] OLDEN, J.: Finite-Element-Analyse von Plattentragwerken durch adaptive Software-Techniken. In: *Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Bauingenieurwesen, Bericht 1/98 des Instituts für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen, Technische Universität Darmstadt* (1998)

[Schneiders u. a. 1996] SCHNEIDERS, R. ; SCHINDLER, R. ; WEILER, F.: Octree-based Generation of Hexahedral Element Meshes. In: *Proceedings 5th International Meshing Roundtable, Pittsburgh, USA* (1996)

[Schönenborn 1999] SCHÖNENBORN, Ingo: Prozeßorientierter Entwurf einer Boden-Tragwerk-Struktur. In: *Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Bauingenieurwesen, Bericht 1/99 des Instituts für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen, Technische Universität Darmstadt* (1999)

[Taylor 1998] TAYLOR, Robert L.: FEAP – A Finite Element Analysis Program / Department of Civil and Environmental Engineering, University of Carlifornia at Berkley. 1998. – Forschungsbericht